

第5回RIBF討論会

中性子スキンと光核反応

電子散乱による不安定核構造研究

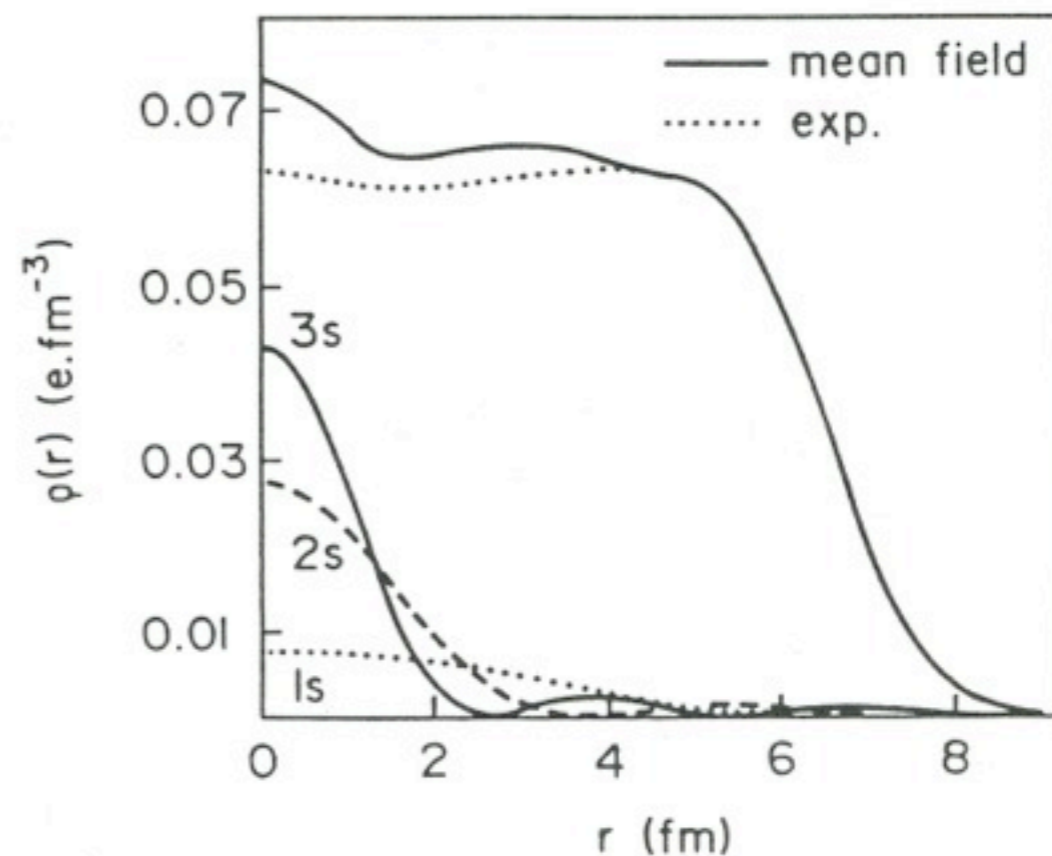
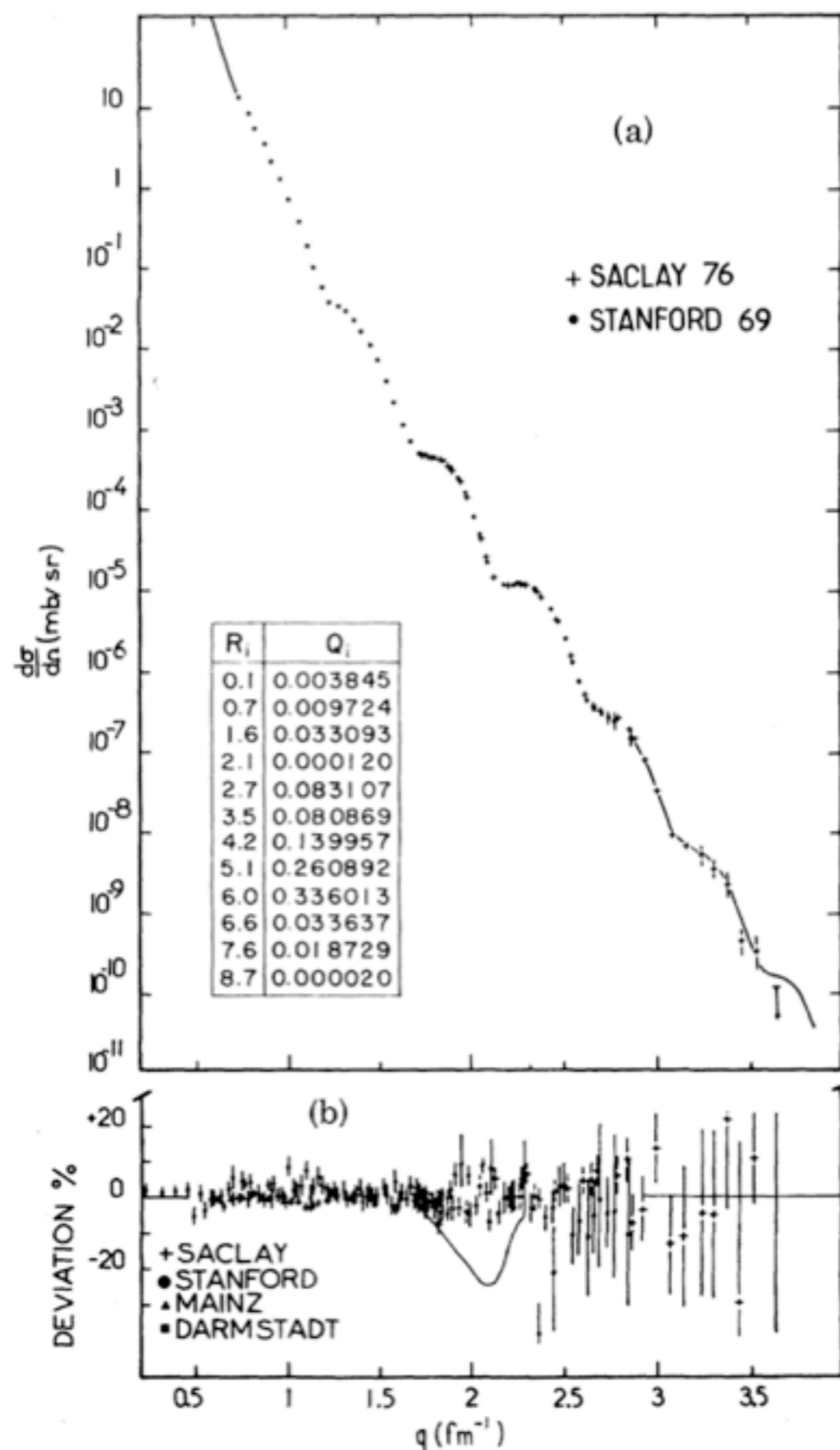
弾性散乱による電荷密度分布測定

非弾性散乱を利用したE1応答関数測定

東北大学・電子光物理学研究センター

須田利美

電子弾性散乱による ^{208}Pb の電荷密度分布 (最も正確な密度分布情報)



- 1) 10桁以上にわたる測定
- 2) 荷電分布は核内部でもほぼ一様
- 3) 理論計算は内部で過大評価
(規格化は陽子数)

RMS charge radius accuracy < 0.001 fm !!

Phys. Rev. Lett. 38(1977)153.

PREX: ^{208}Pb Neutron Radius Experiments at JLAB

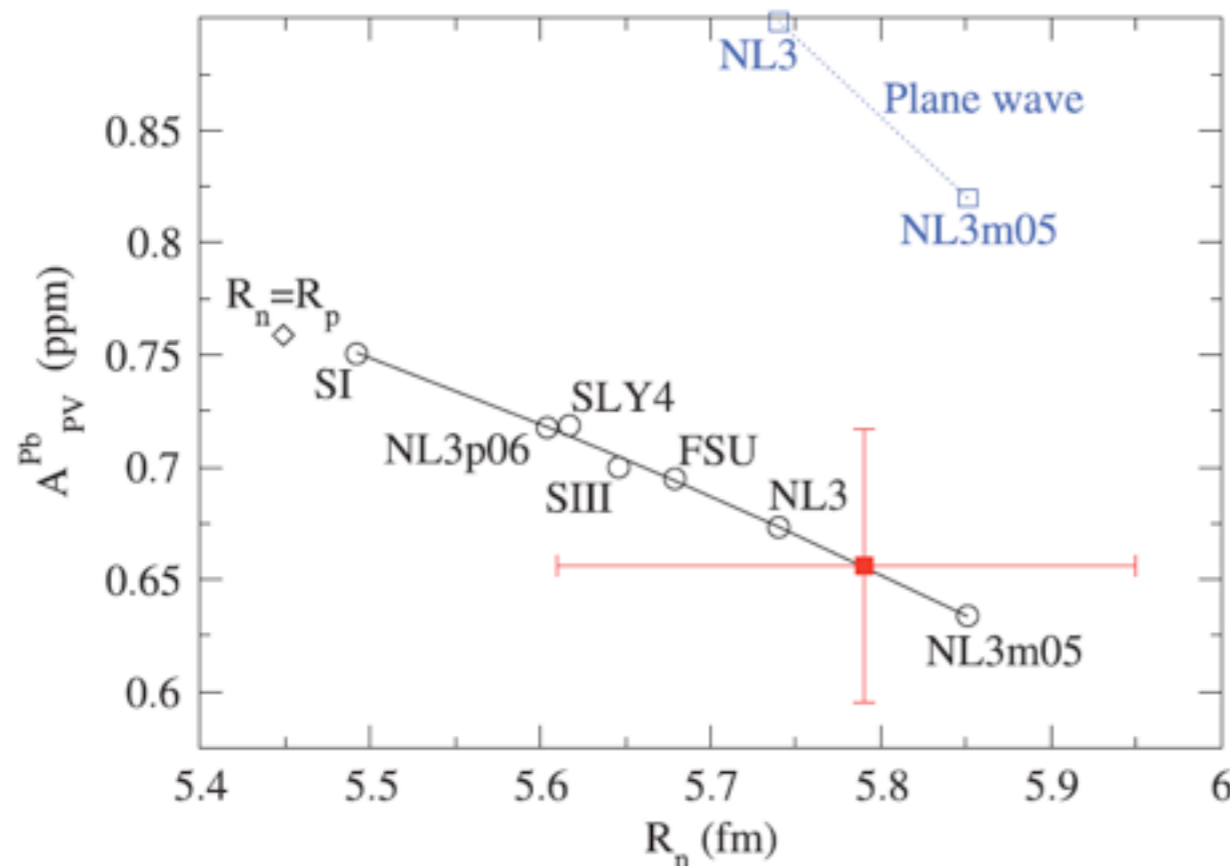
goal : $\langle r_n^2 \rangle^{1/2}$ with an accuracy of 1% (± 0.05 fm)

Advantage:

- 1) clean : electro-weak interaction
- 2) probing the whole volume
- 3) perturbation theory

$$A_{PV} = \frac{\sigma_R - \sigma_L}{\sigma_R + \sigma_L} \sim \frac{G_F Q^2}{4\pi\alpha\sqrt{2}} \frac{F_W(Q^2)}{F_{ch}(Q^2)}$$

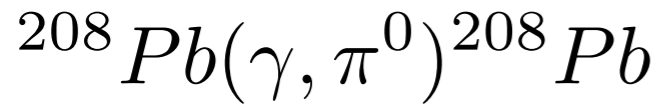
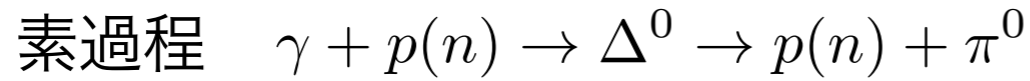
	proton	neutron
electric charge	1	0
weak charge	0.0721	-0.9878



$$R_n - R_p = 0.33^{+0.16}_{-0.18}$$

PRL 108 (2012) 112502.

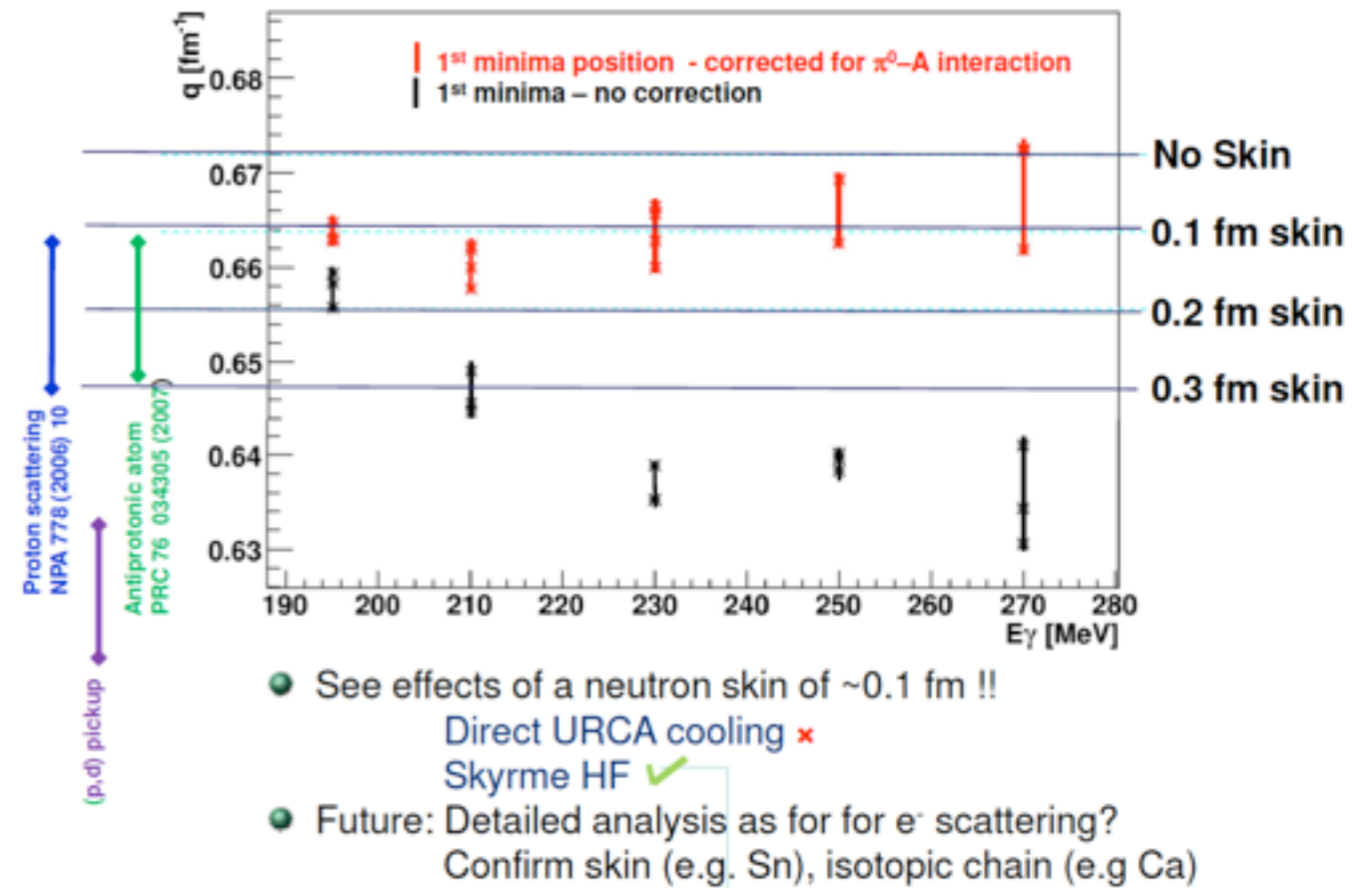
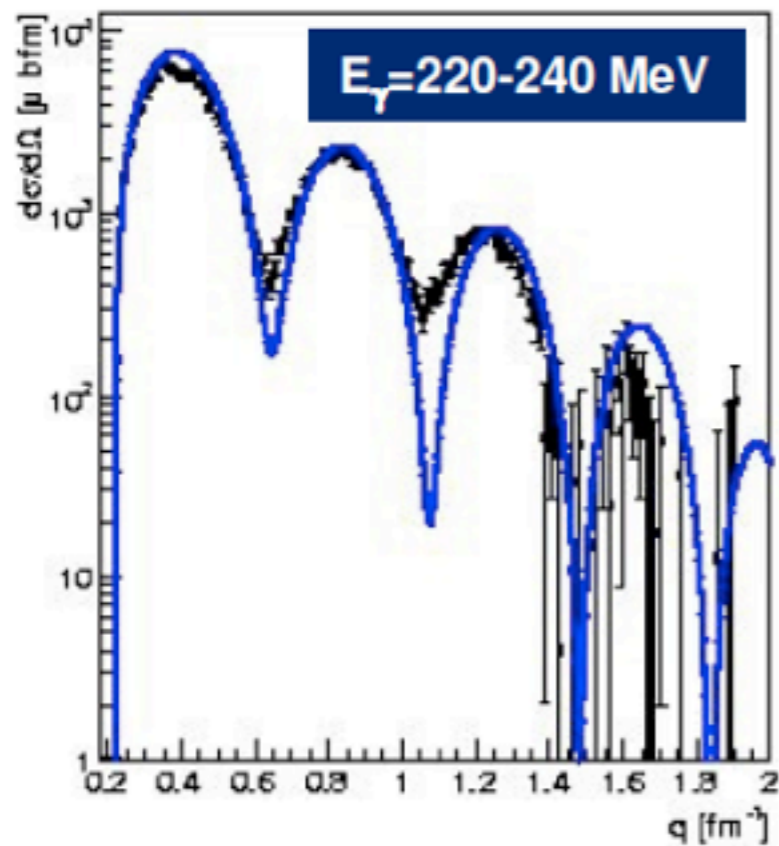
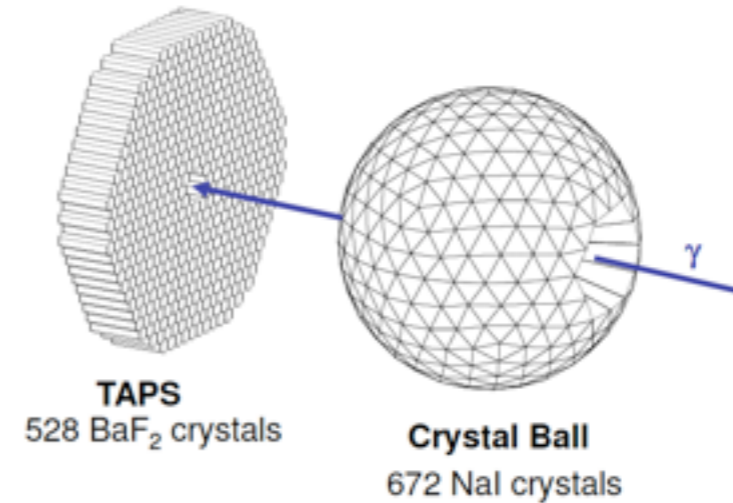
Coherent (neutral) pion photoproduction



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto |F_m(q)|^2 \sin^2 \theta_\pi$$

matter form factor

A2 @ Mainz (MAMI)



D. Watts (PREX2008)

neutron skin via $\sigma_{TOT}(E_\gamma)$

Correlation between polarizability and neutron skin

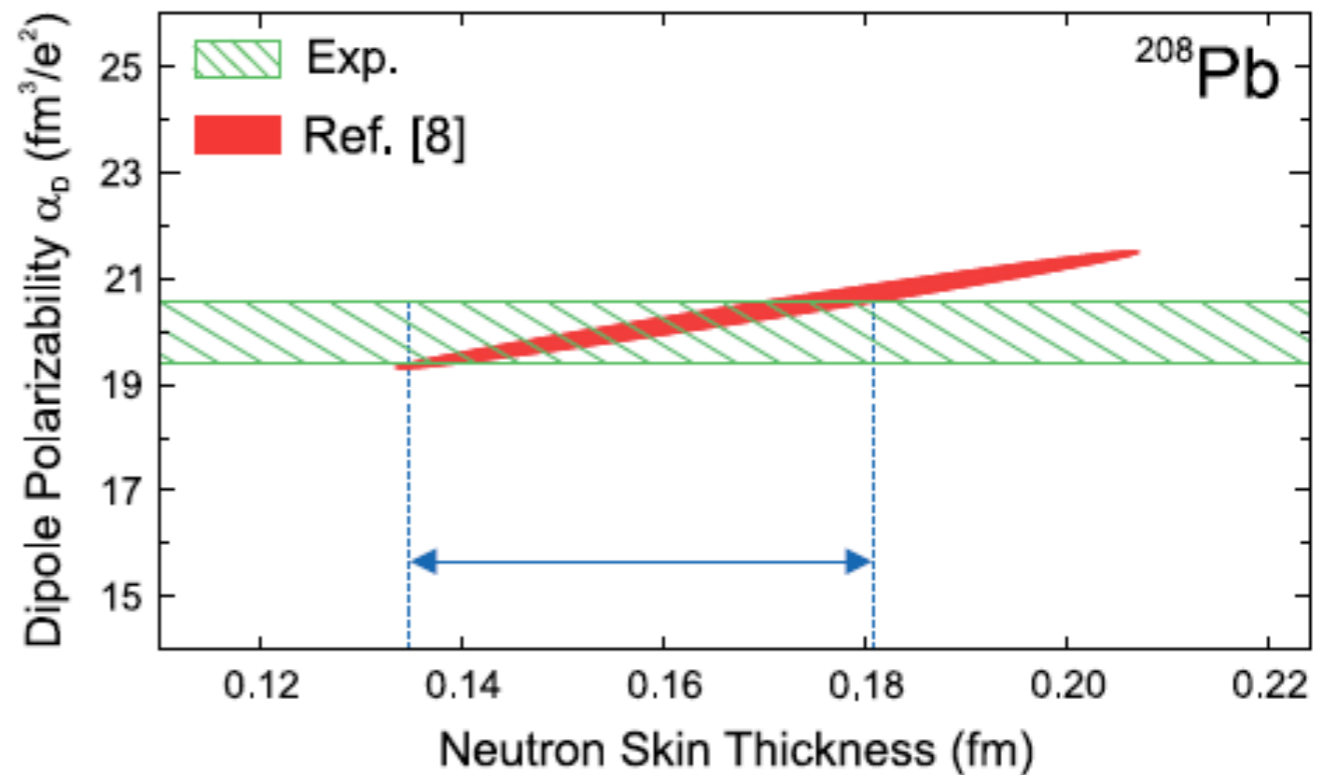
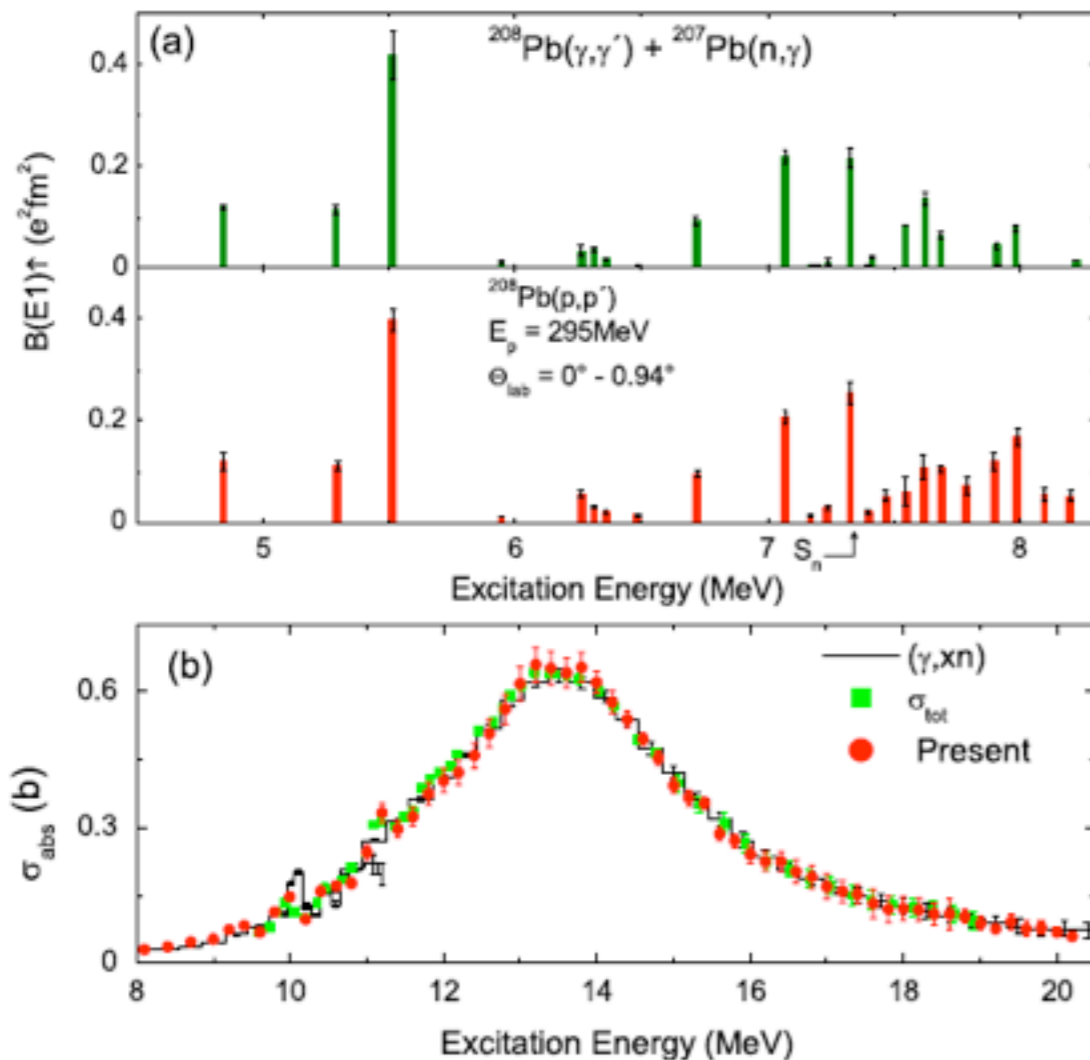
Polarizability $\vec{d} = \alpha \vec{E}$

1) Compton scattering

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{point} - E_\gamma E'_\gamma \left(\frac{E'_\gamma}{E_\gamma}\right)^2 \frac{e^2}{m} \left[\frac{\alpha + \beta}{2} (1 + \cos\theta_\gamma)^2 + \frac{\alpha - \beta}{2} ((1 - \cos\theta_\gamma)^2) \right]$$

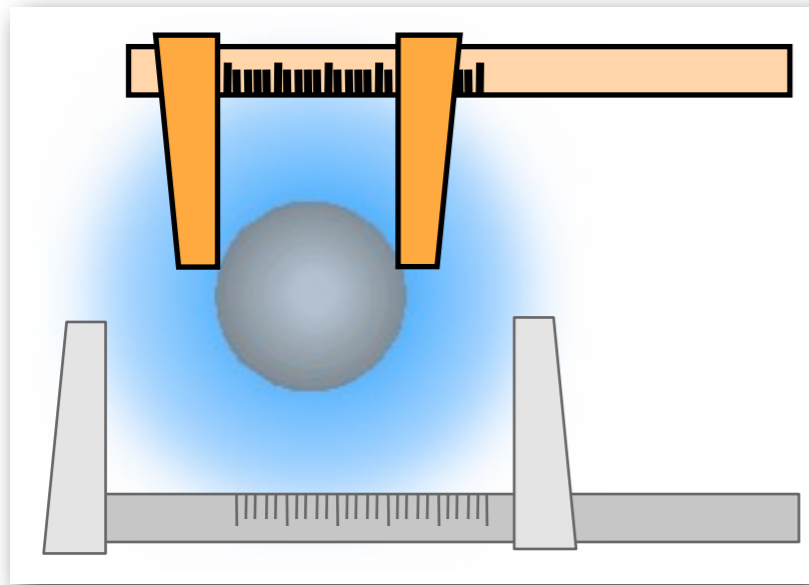
2) total photoabsorption

Migdal sum rule $\int_0^\infty \frac{\sigma(E_\gamma)}{E_\gamma^2} dE_\gamma = \frac{2\pi^2}{\hbar} P$

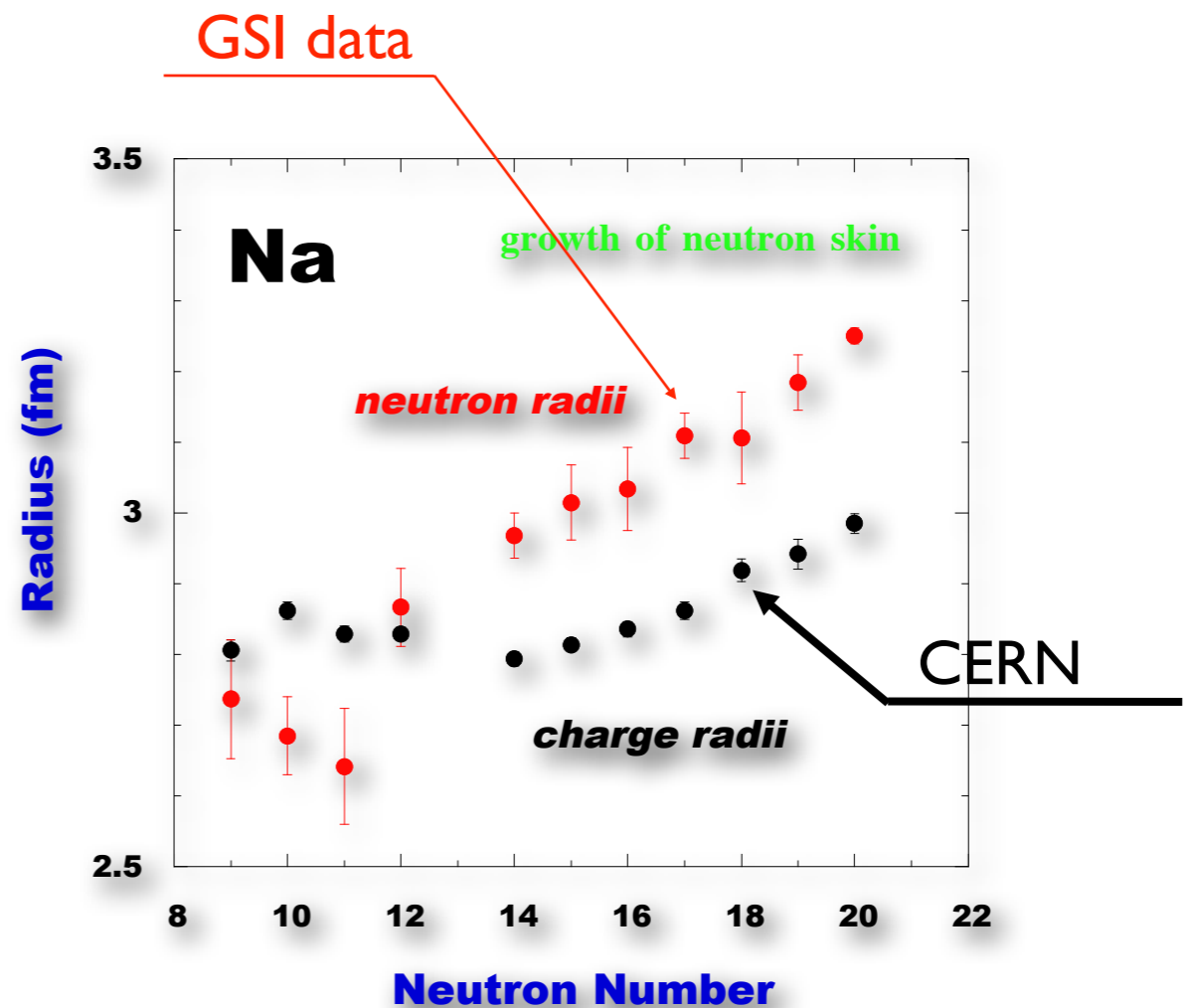
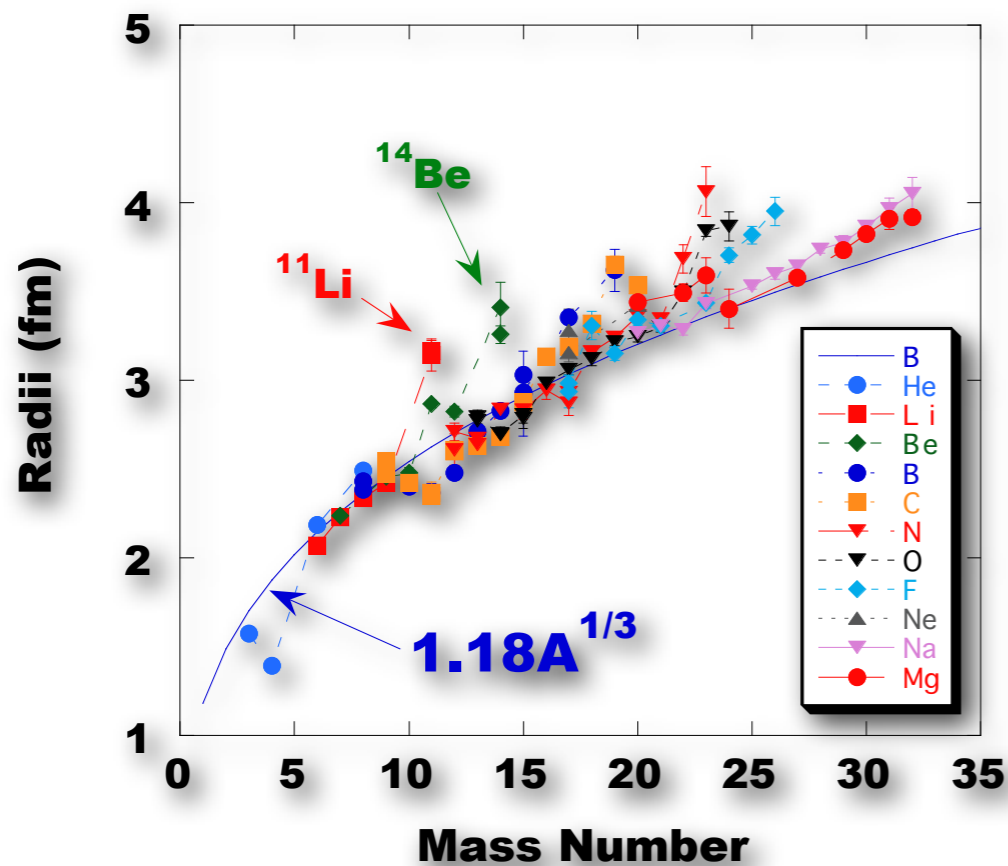


中性子スキン

$$\langle r^2 \rangle = \int r^2 \rho(r) d\vec{r} \quad \rho_c(\vec{r}) = \sum_p \psi^*(\vec{r}) \psi(\vec{r})$$



	size	shape
proton	isotope shift	electron scattering
neutron	reaction cross section	proton scattering



電子散乱による短寿命不安定核の構造研究

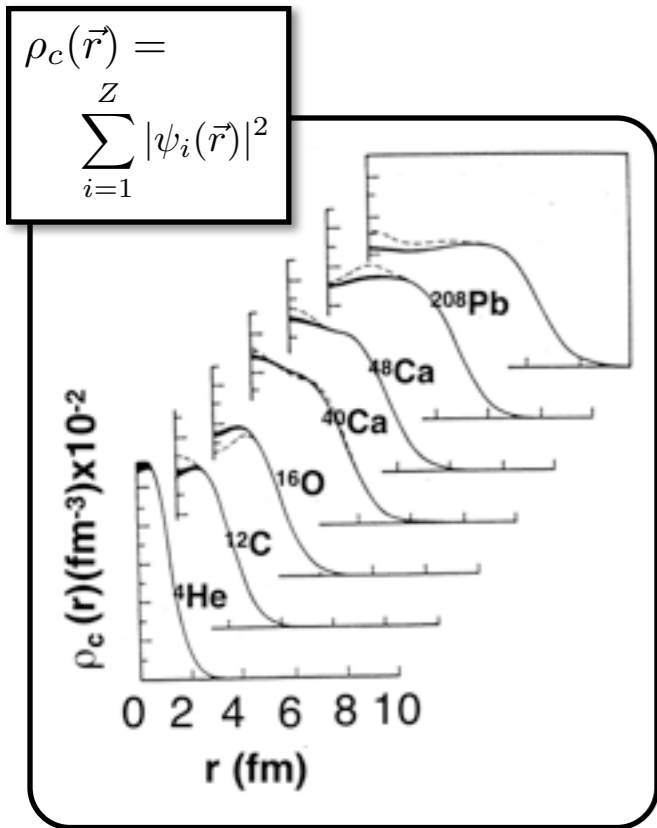
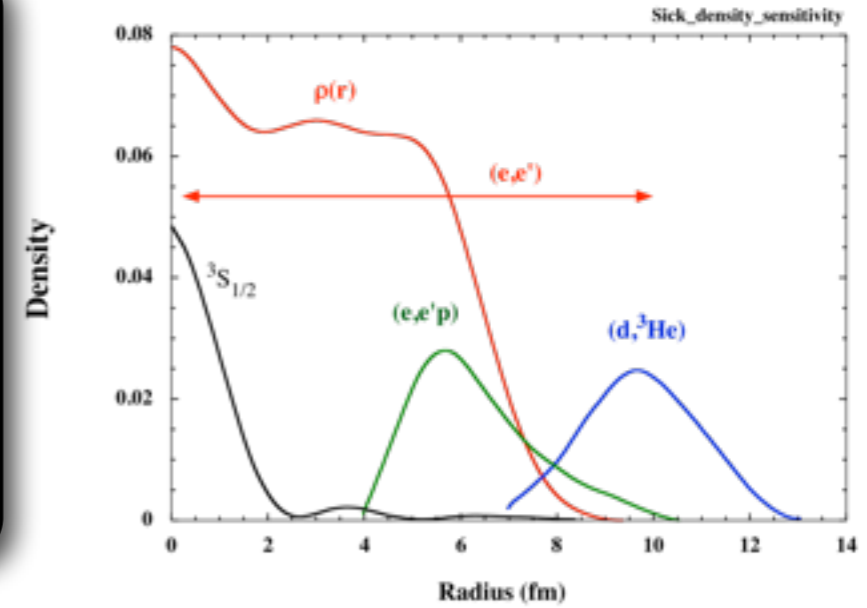
電子散乱による安定核の内部構造の研究

特徴

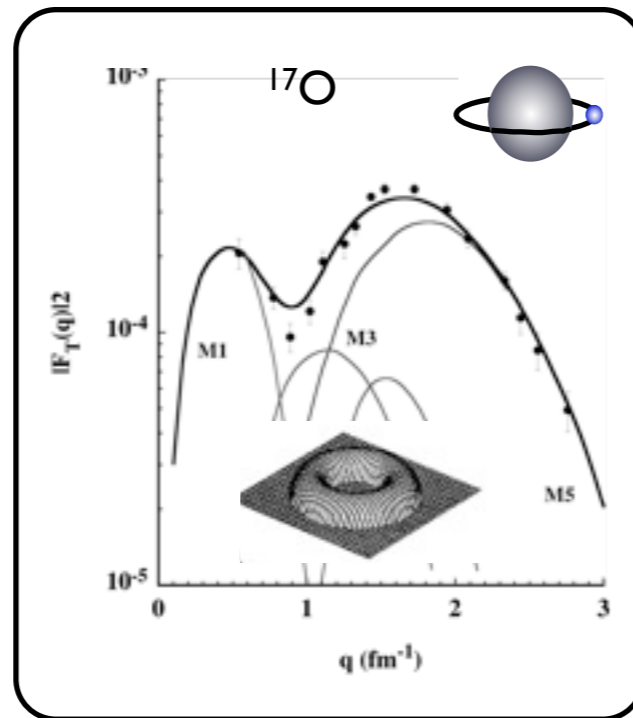
1. 素粒子
2. 電磁相互作用
 - i) 反応機構に不定性無し
 - ii) "弱い"

芯部を含む原子核全体をプローブ
摂動計算

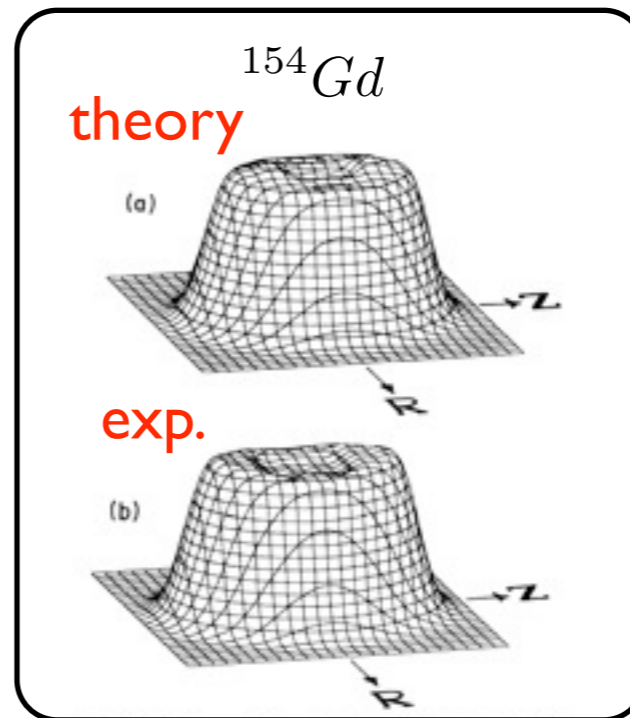
$$\omega = e - e'$$

$$\vec{q} = \vec{e} - \vec{e}'$$


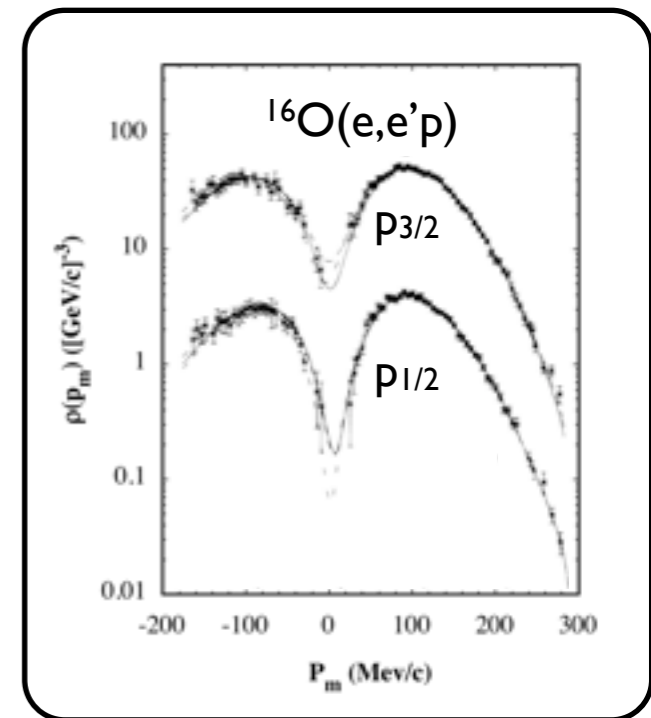
弾性散乱：電荷分布
最も正確な形状



弾性散乱：価中性子軌道

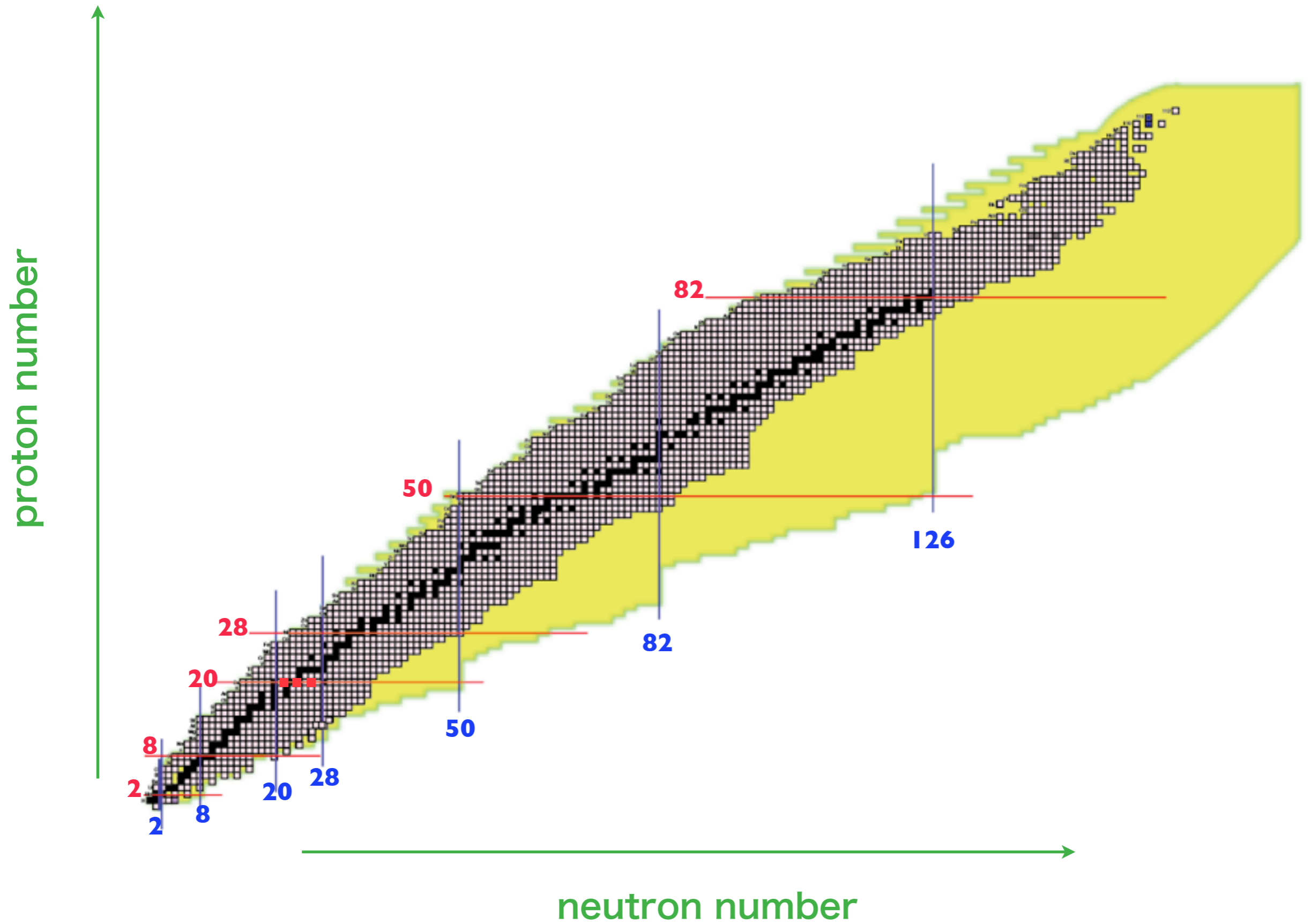


弾性散乱 + 非弾性散乱
変形核形状

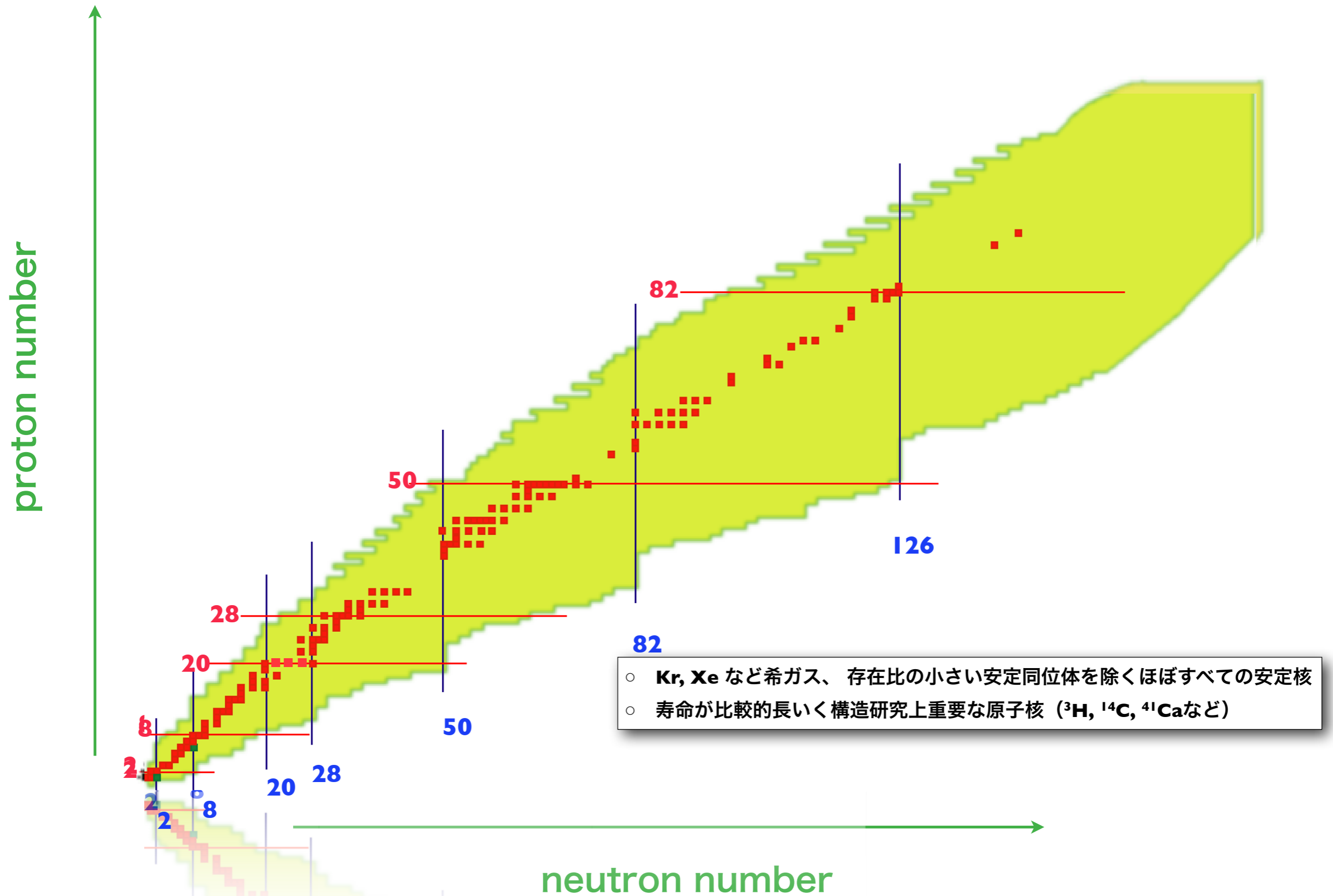


準弾性散乱 (e,e'p)：
核内陽子の運動量分布
分光因子

核図表



核図表



短寿命不安定核に対する電子散乱

生成困難、短寿命で崩壊 ⇨ 標的数に限界

Challenges for experimentalists !

ルミノシティー制限：弾性散乱（最も大きな散乱断面積）

⇨ 安定核に対する R. Hofstadter 実験に相当



R. Hofstadter
Nobel Prize in Physics (1961)

電子弾性散乱断面積（原子核スピン0）

PWIA近似

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} |F_c(q)|^2$$

$$\vec{q} = \vec{e} - \vec{e}'$$

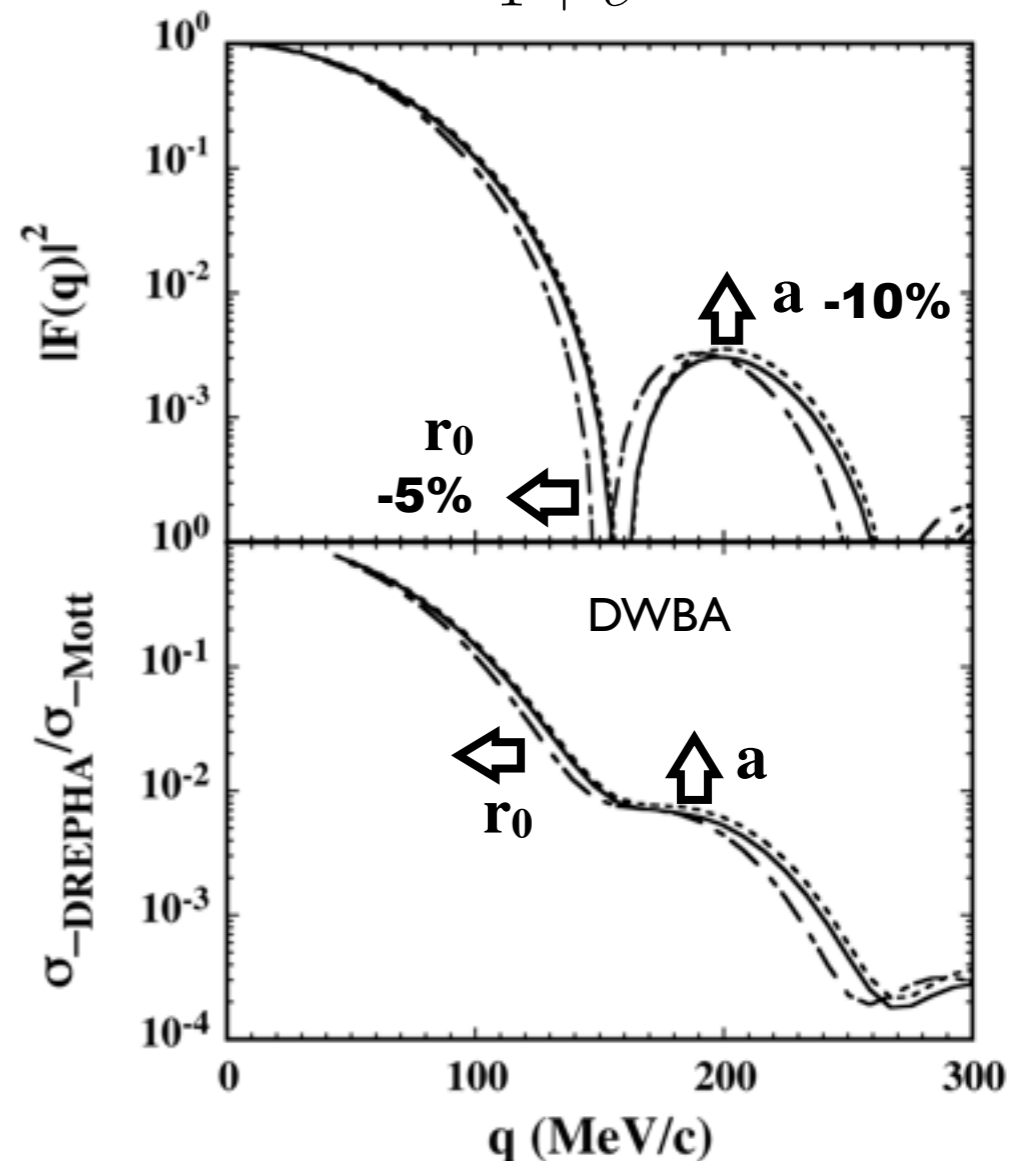
$$(|\vec{q}| = 2e \sin(\frac{\theta}{2}))$$

$$\frac{d\sigma_{Mott}}{d\Omega} = \frac{z^2 \alpha^2 \cos^2(\frac{\theta}{2})}{4e^2 \sin^4(\frac{\theta}{2})}$$

$$F_c(q) = \int \rho_c(\vec{r}) e^{i\vec{q}\vec{r}} d\vec{r}$$

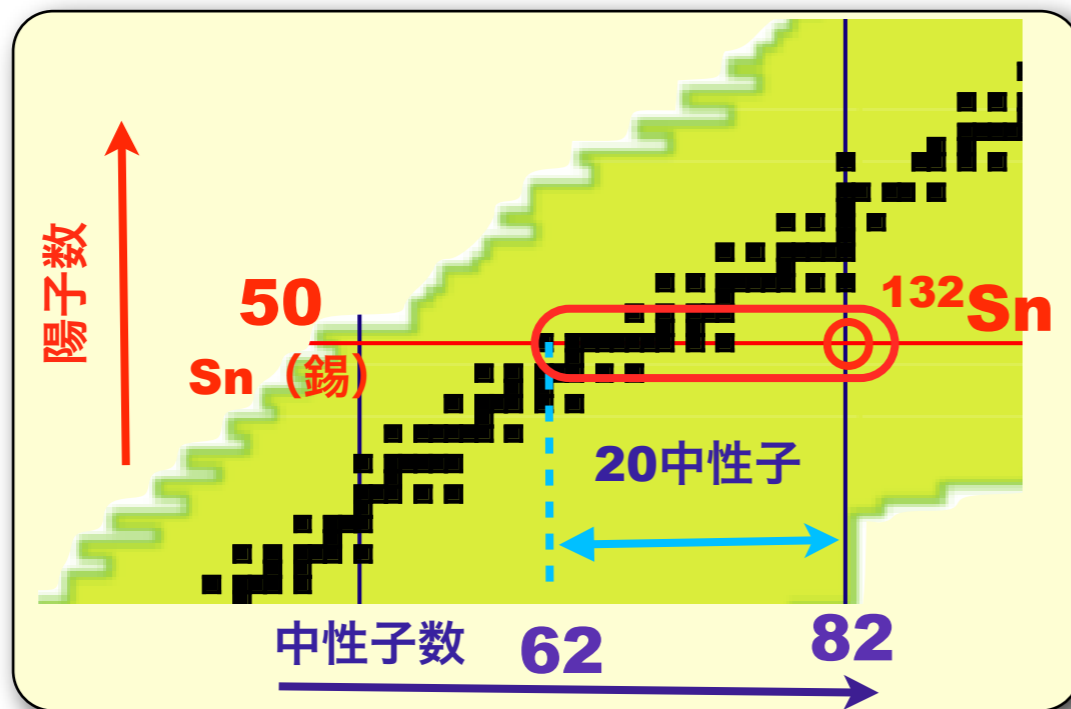
$$\rho_c(\vec{r}) = \sum_{i=1}^Z |\psi_i(\vec{r})|^2$$

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{\frac{r-r_0}{a}}}$$



^{132}Sn (陽子 50, 中性子82:寿命40秒) を含む Sn 同位体の電荷分布

中性子数増加(62 - 82ヶ)に伴う陽子分布変化の決定



112-124Sn : 安定核

126-132Sn : 短寿命不安定核

^{126}Sn : 10^5 年

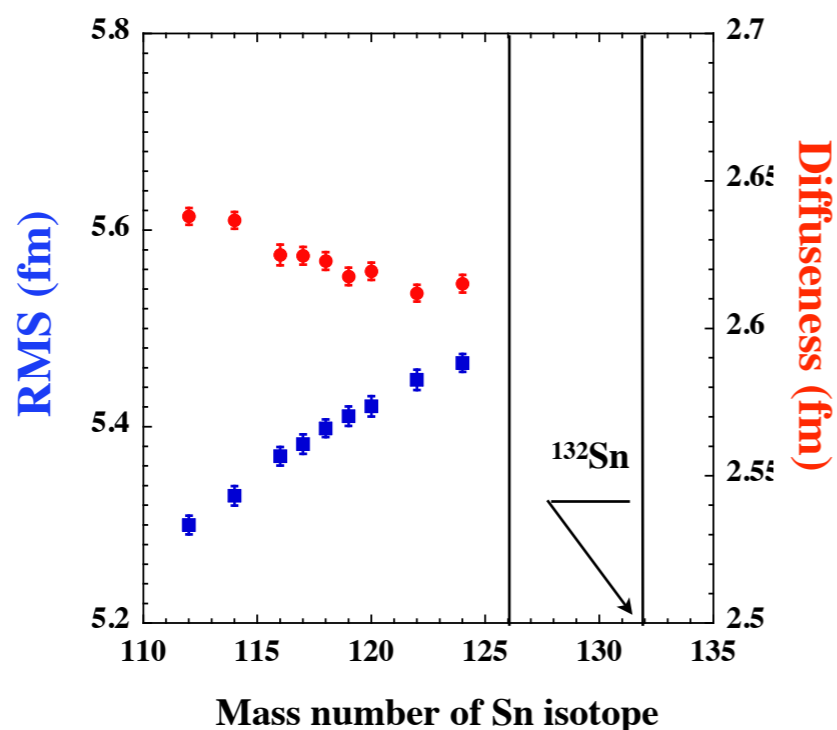
^{128}Sn : 59分

^{130}Sn : 3.7分

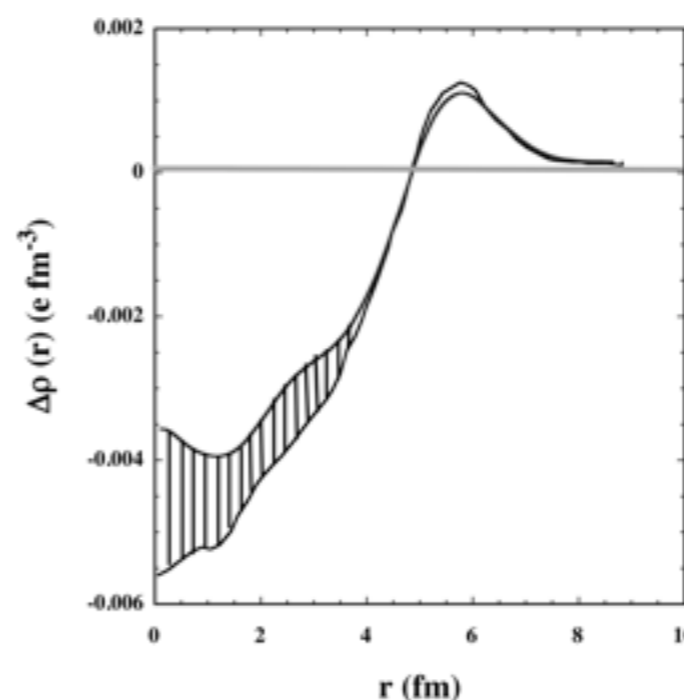
^{132}Sn : 39秒

^{134}Sn : 1.2秒

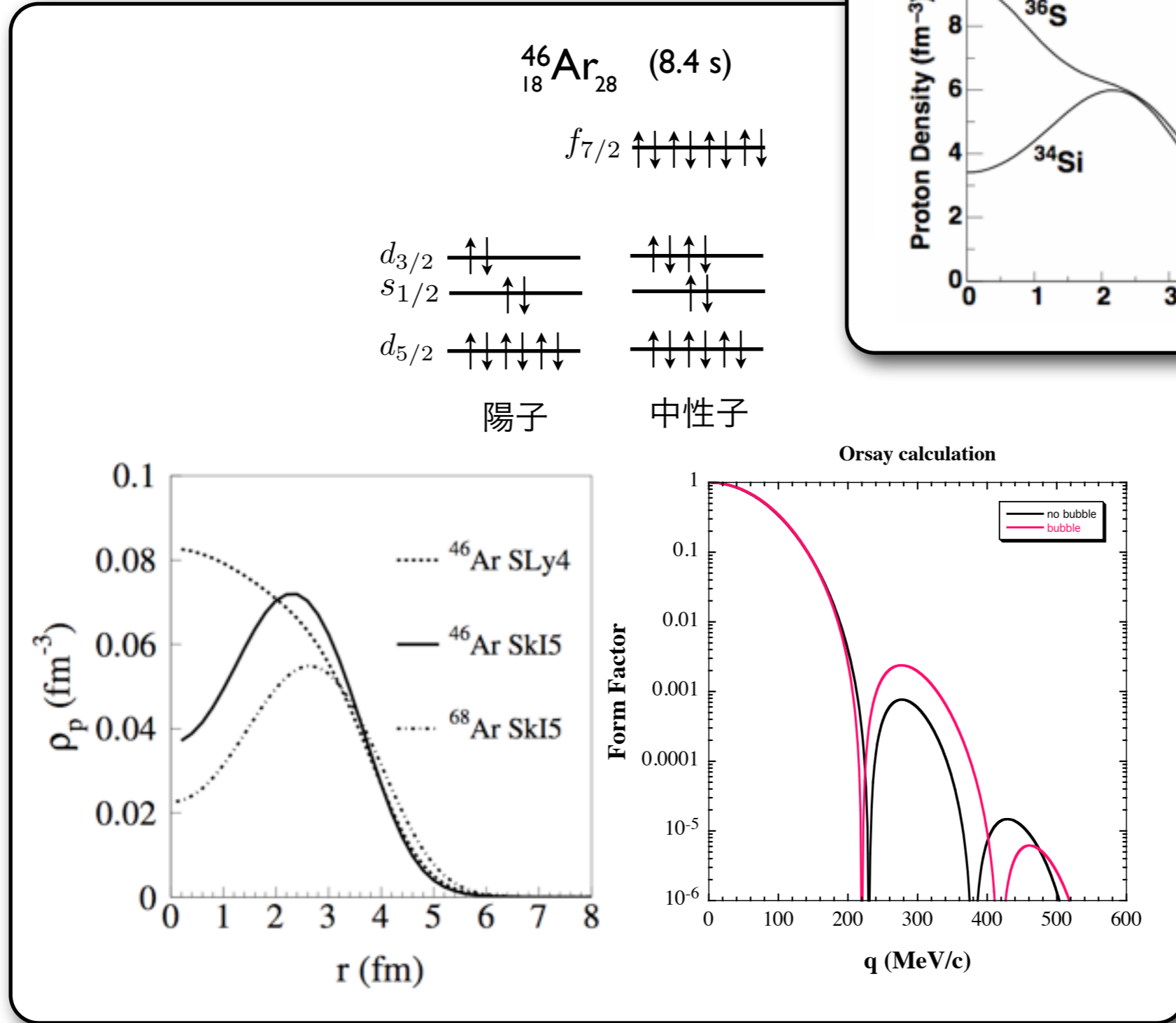
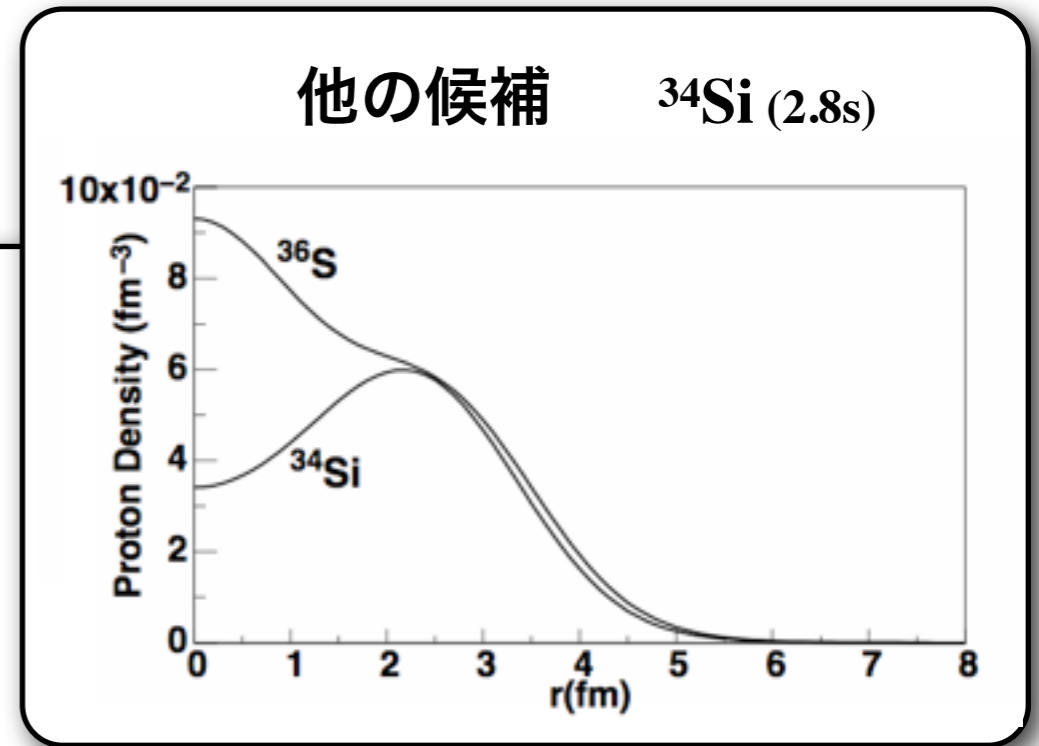
電荷分布の変化



$$\rho_p(^{124}\text{Sn}) - \rho_p(^{116}\text{Sn})$$



”穴あき”原子核？

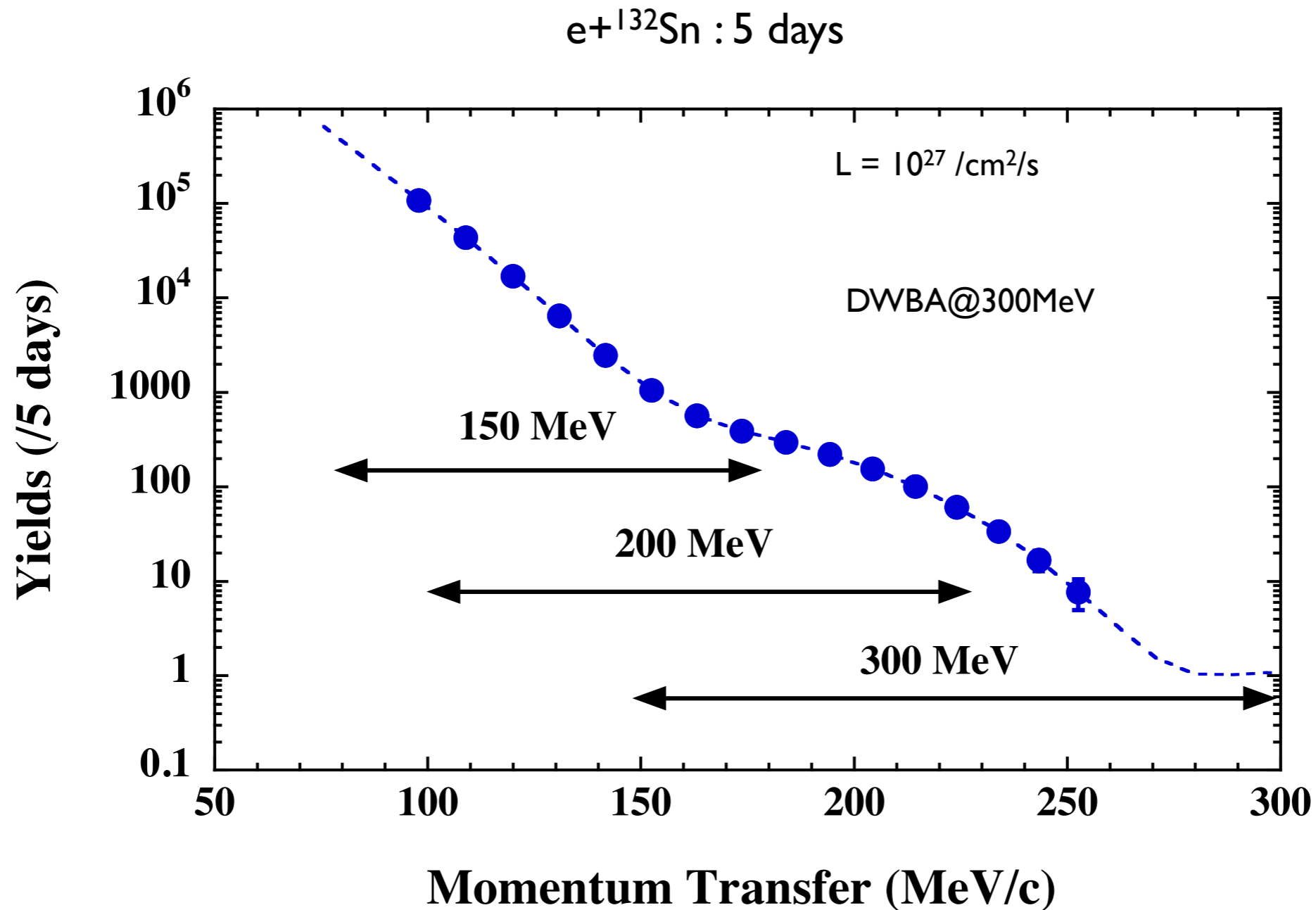


不安定核電子散乱関係の理論論文

- E. Garrido and E. Moya de Guerra, Nucl. Phys. A 650(1999) 387.
E. Garrido and E. Moya de Guerra, Phys. Lett. B488 (2000) 68.
Z. Wang and Z. Ren, Phys. Rev. C70 (2004) 034303.
A. N. Antonov et al., Phys. Rev. C72 (2005) 044307.
Z. Wang and Z. Ren, Phys. Rev. C71 (2005) 054323.
Z. Wang, Z. Ren and Y. Fan, Phys. Rev. C73 (2006) 014610.
P. Sarriguren et al., Phys. Rev. C76 (2007) 044322.
S. Karataglidis and K. Amos, Phys. Lett. B650 (2007) 148.
C. A. Bertulani, J. Phys. G34 (2007) 315.
X. Roca-Mosa et al., Phys. Rev. C78 (2008) 044332.
X. Roca-Mosa et al., Phys. Rev. C87 (2013) 014304.

弾性散乱実験に必要なルミノシティ

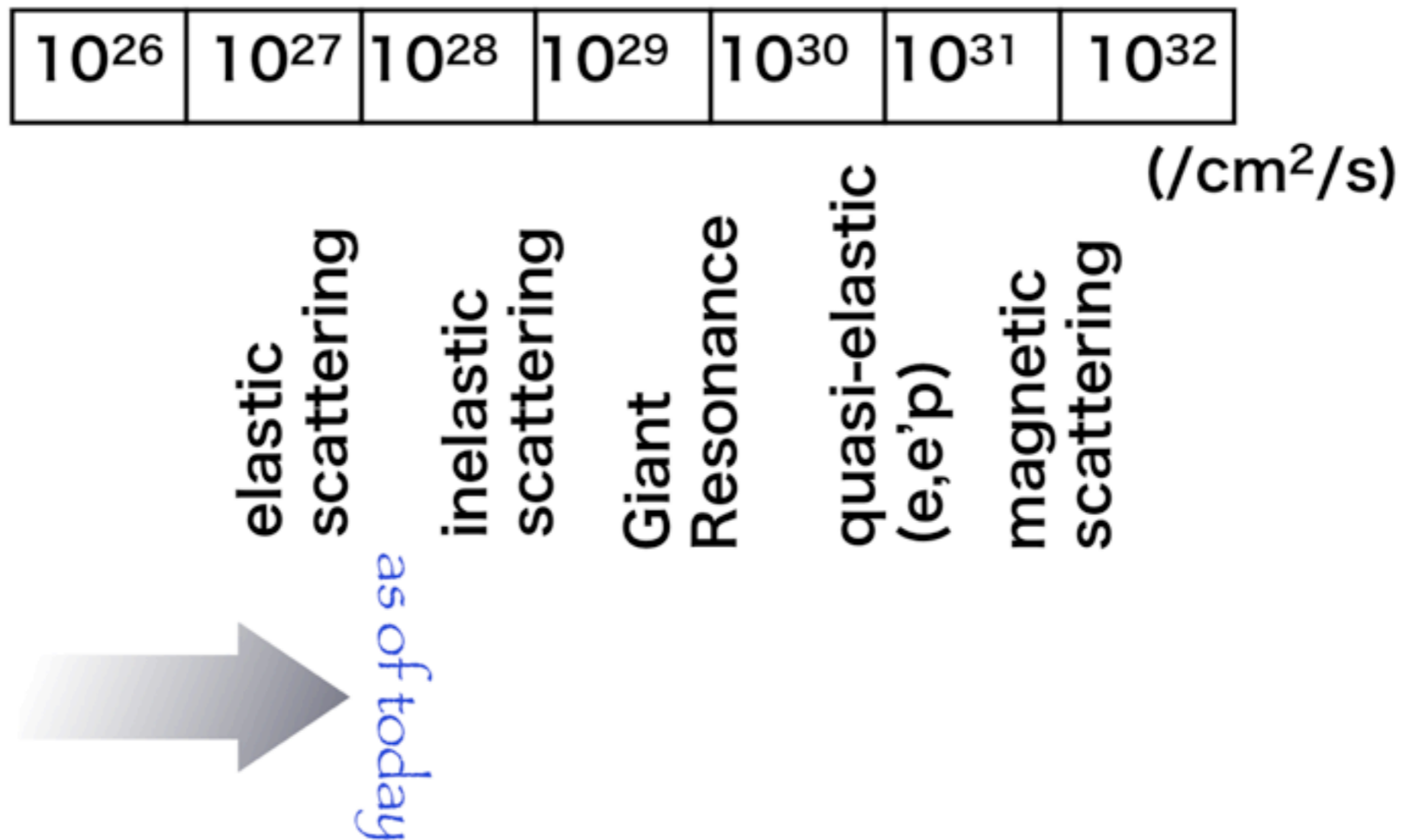
電子エネルギー： $E_e = 150 - 300 \text{ MeV}$



半径および diffuseness は数%の精度で決定出来る

必要な Luminosity

- 弾性散乱 → 電荷分布、価中性子空間分布
- 非弾性散乱 → 遷移密度分布
- 準弾性散乱 → 核内陽子運動量分, 光学因子
-



The SCRIT Electron Scattering Facility

世界初の短寿命不安定核専用の
電子散乱実験施設の建設

理化学研究所

東北大学

立教大学

電子散乱実現のための新しい標的生成法とその実証

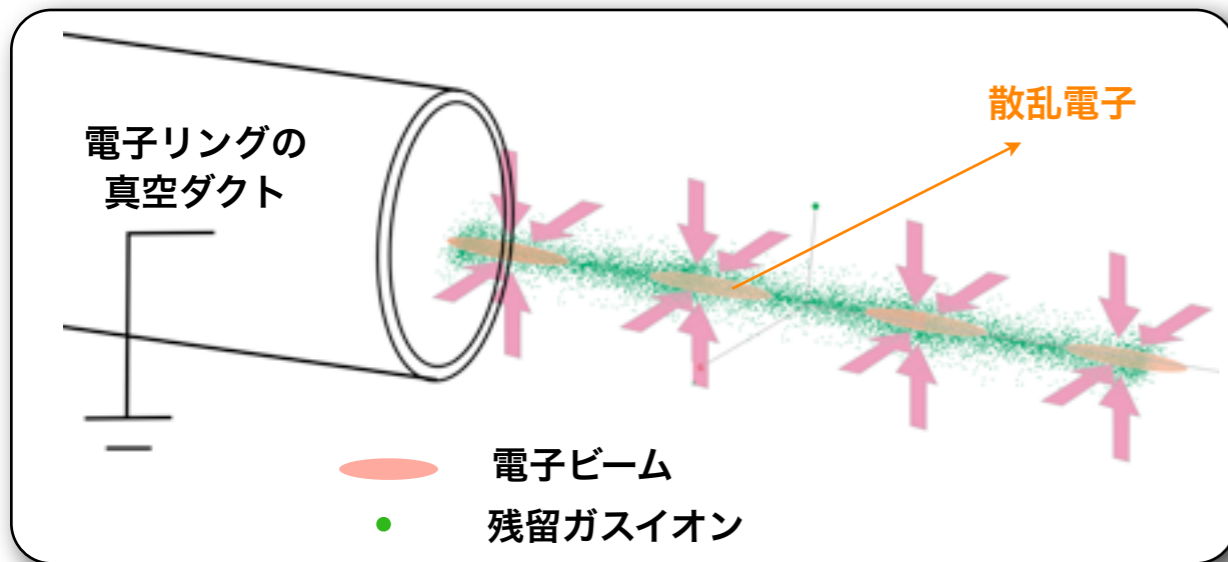
Nucl. Instrum. and Method A278 (2004) 216.
Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 164801
Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 102501

SCRIT 法 (Self-Confining RI Target)

着想

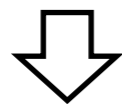
イオン捕獲現象@電子リング (放射光リング)

電子ビームによりイオン化された
残留ガスイオンが電子ビームに捕獲



蓄積ビームの短寿命化 (電子散乱!)

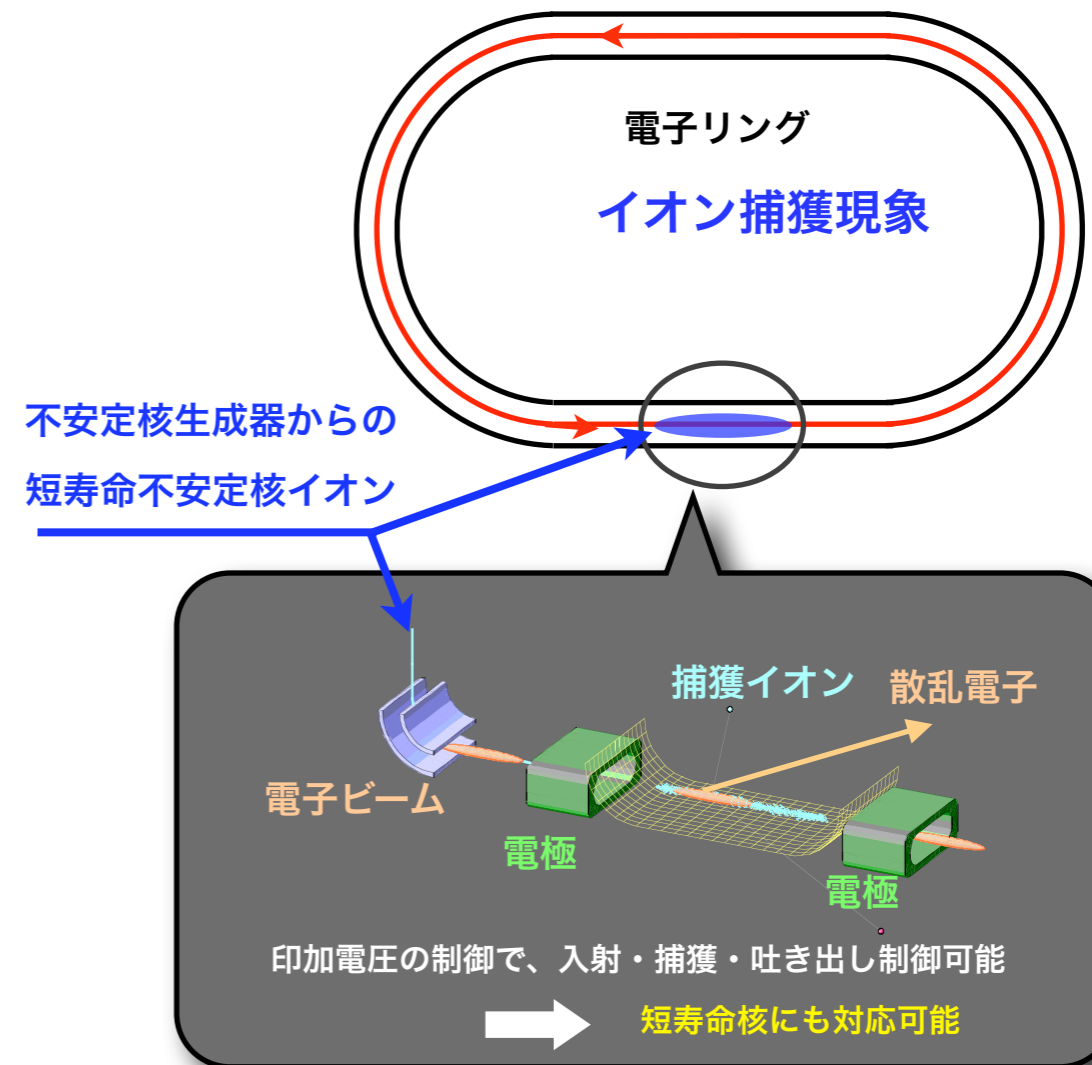
蓄積ビームの不安定化



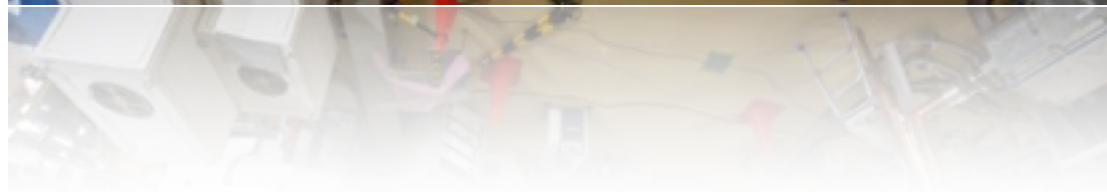
電子蓄積リングの”問題児”

発想の転換

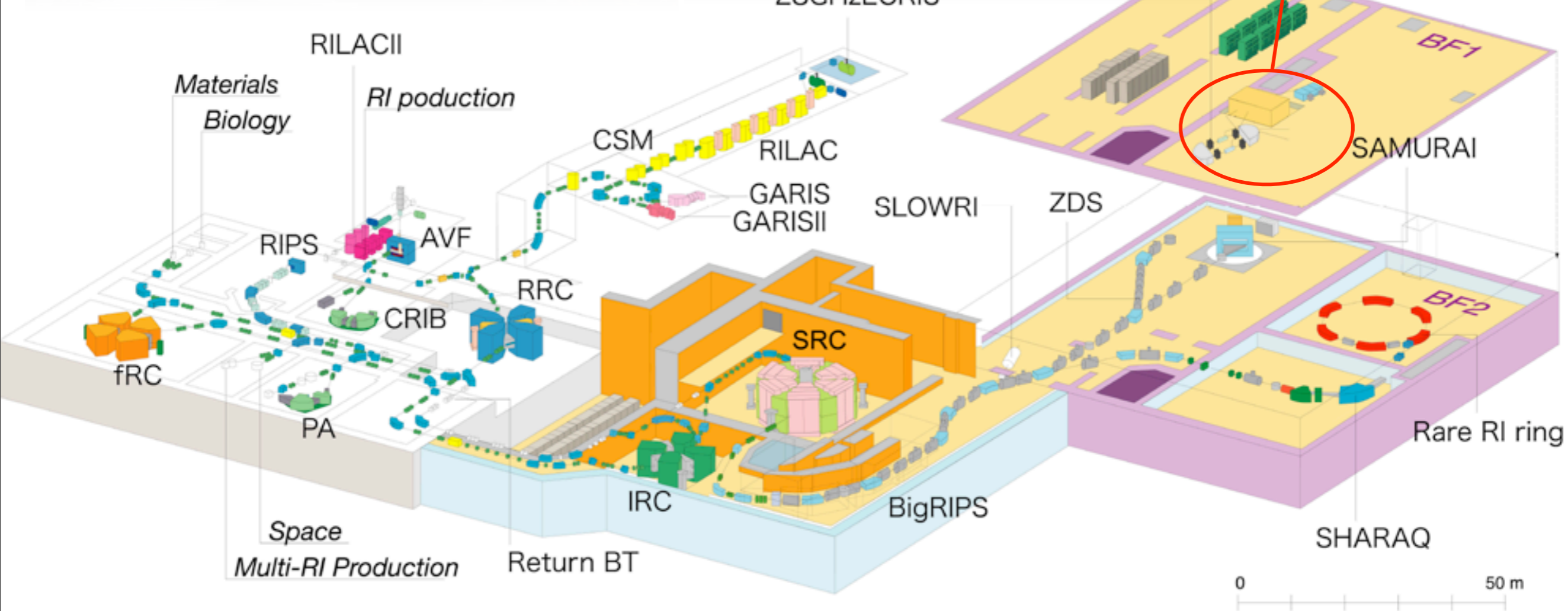
イオン捕獲現象により不安定核イオンを電子ビーム上に捕獲
(電子・不安定核イオン衝突は自動的に起こる)



SCRIT電子散乱施設



e-RI scattering with SCRIT

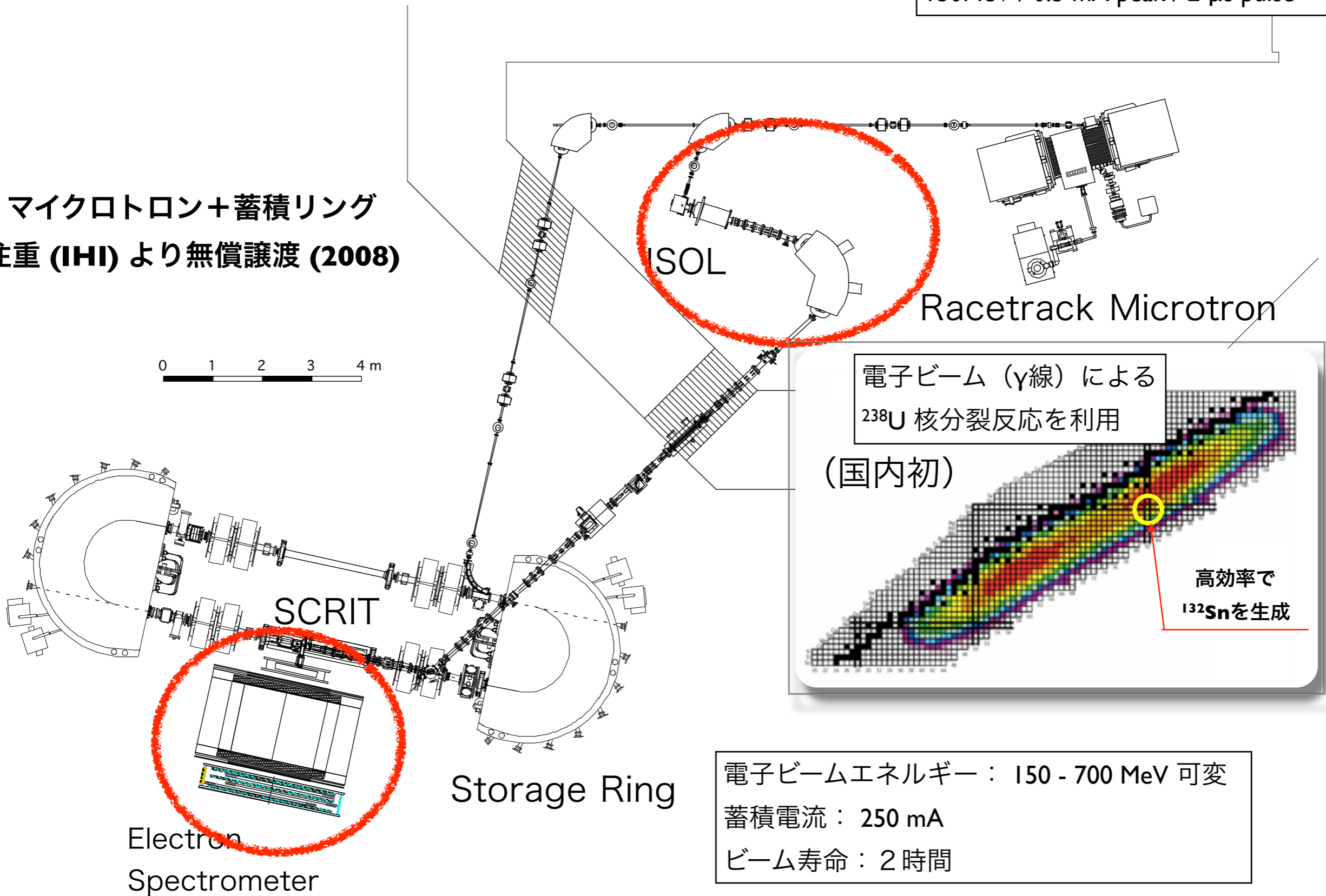


SCRIT電子散乱施設

電子マイクロトロン
(入射器およびRI生成用ドライバー)
150MeV / 0.5 mA peak / 2 μ s pulse

マイクロトロン+蓄積リング
住重 (IHI) より無償譲渡 (2008)

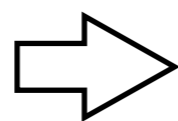
0 1 2 3 4 m



電子ビームエネルギー： 150 - 700 MeV 可変
蓄積電流： 250 mA
ビーム寿命： 2 時間

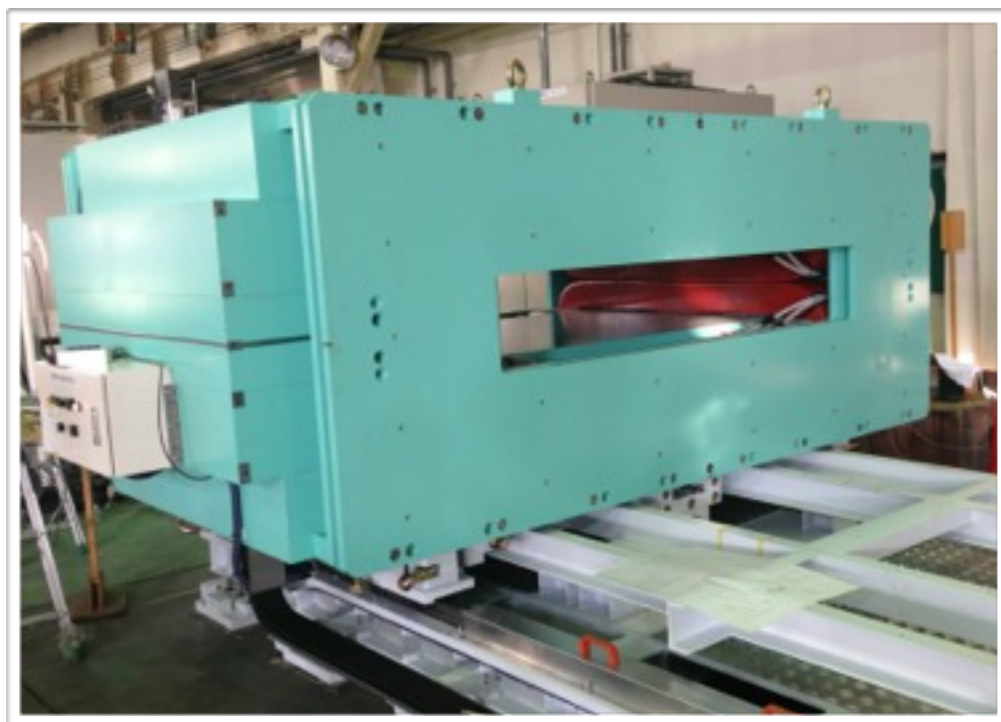
電子スペクトロメータならびに検出器系

弾性散乱同定
極低ルミノシティ
SCRIT領域（長い標的）
角度依存性



high resolution $\Delta p/p \leq 10^{-3}$
large acceptance $\sim 100 \text{ msr}$
long-target acceptance 40 cm
wide θ coverage $\Delta\theta = 30^\circ (45 \pm 15^\circ)$

散乱電子用電磁石



完成、RIBF棟に搬入（2月9日）

散乱電子軌跡測定器（ドリフトチェンバー）

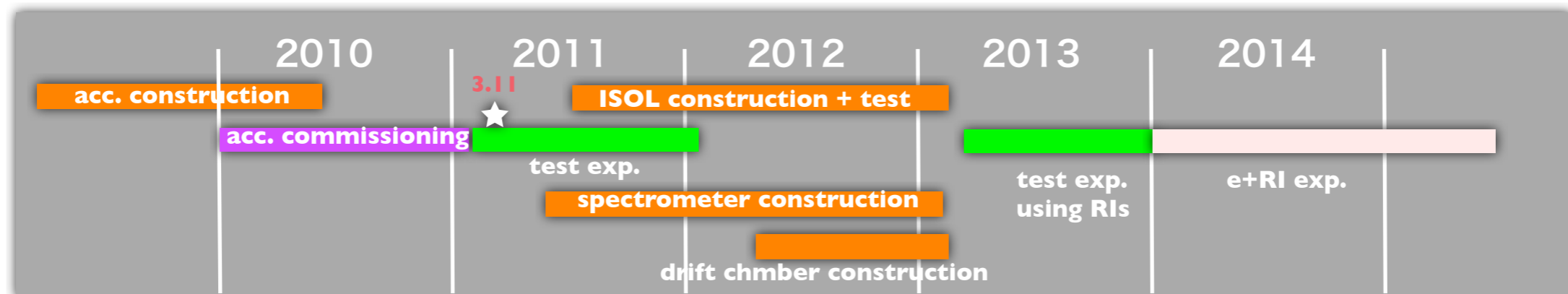


2月13日千葉県館山

2月中に完成予定

SCRIT electron scattering facility の特徴

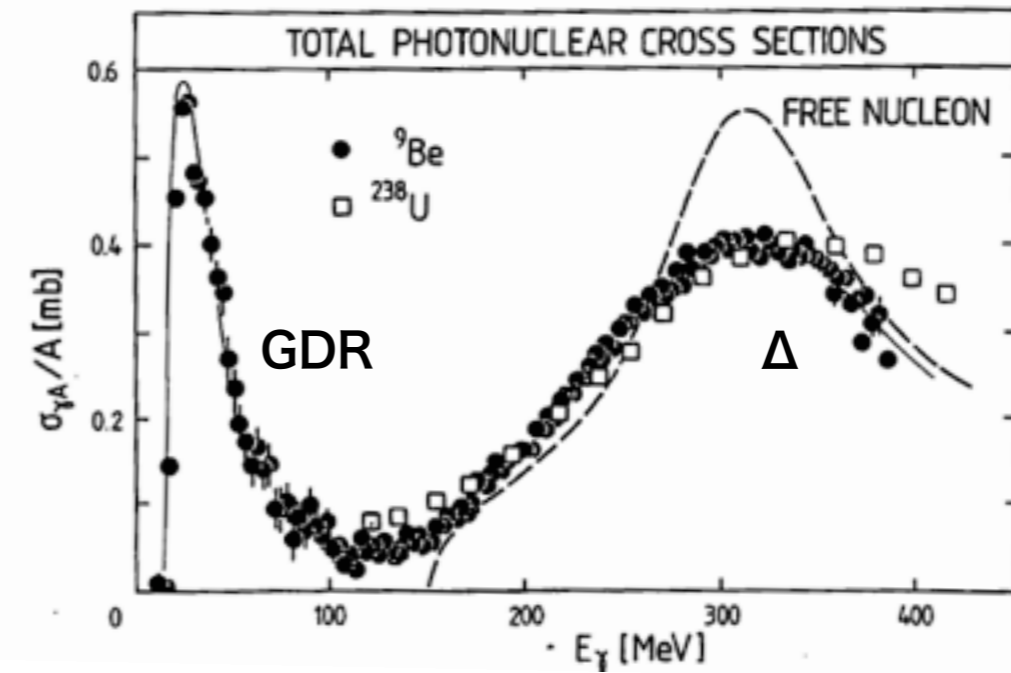
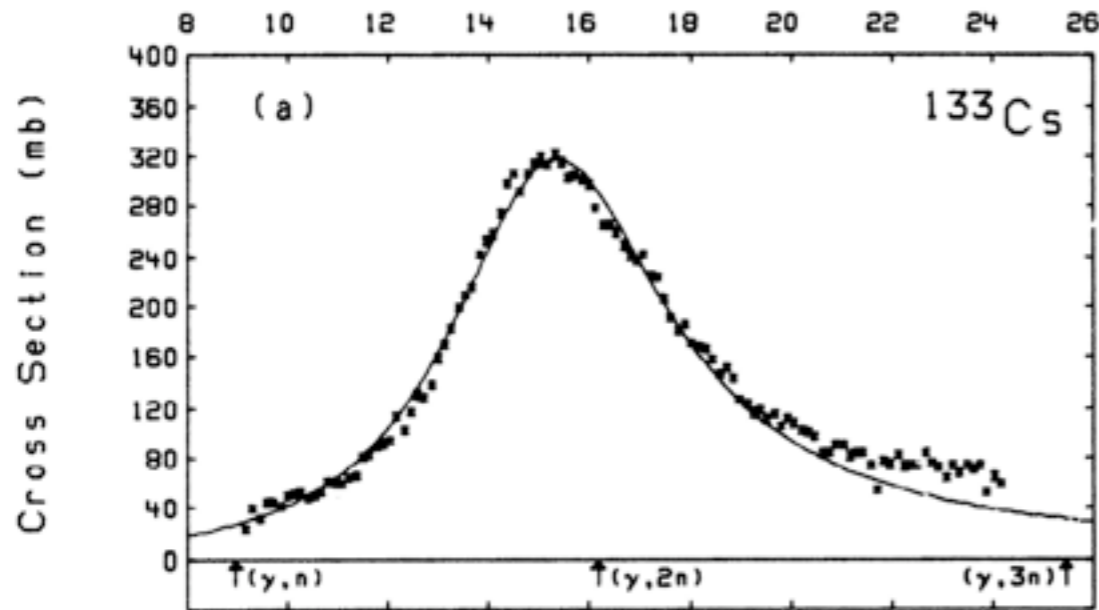
1. 世界初、現時点で世界唯一の不安定核専用電子散乱施設
2. 理研 RI ビームファクトリーのサイクロトロン群とは独立
独自の不安定核生成装置 (ISOL)
加速器を使用した開発や実験が常時できる
3. 現在建設中
 - a) 日本初の電子 (光) 核分裂反応を利用したISOL (今年度中に初照射)
 - b) 散乱電子検出器系
電磁石完成
検出器系 まもなく完成
4. 来年度中に初の $e+^{132}\text{Sn}$ 散乱。本格的実験は2014年度



SCRIT電子散乱施設での新しい研究計画

短寿命不安定核の光核反応

原子核の全光吸収断面積 (電磁場に対する応答)



1) 外場に対する応答関数 (operator は well-known)

2) 各種 sum rule

TRK sum rule
$$\int_0^\infty \sigma(E_\gamma) dE_\gamma = \frac{2\pi^2 e^2 \hbar}{M} \frac{NZ}{A} (1 + \kappa) = 60 \frac{NZ}{A} (1 + \kappa) \text{MeV} \cdot \text{mb}$$

Bremmstrahlung sum rule
$$\int_0^\infty \frac{\sigma(E_\gamma)}{E_\gamma} dE_\gamma = \frac{4\pi^2 e^2}{3\hbar} \frac{NZ}{A-1} \langle r^2 \rangle$$

Migdal sum rule
$$\int_0^\infty \frac{\sigma(E_\gamma)}{E_\gamma^2} dE_\gamma = \frac{2\pi^2}{\hbar} P$$
 P : polarizability

Polarizability 測定例

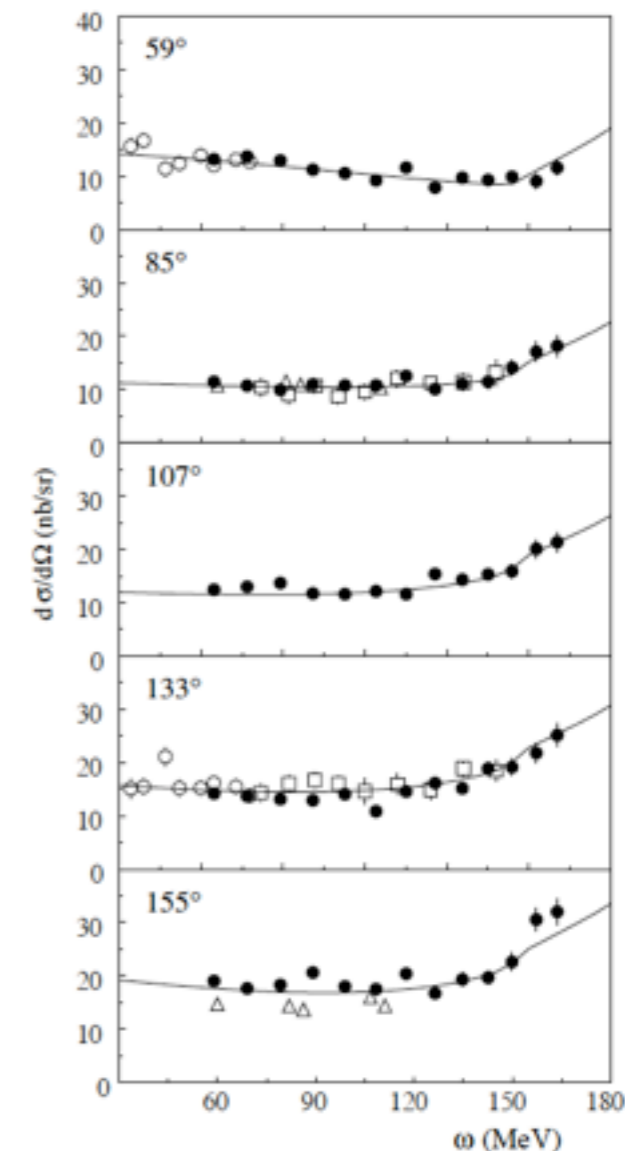
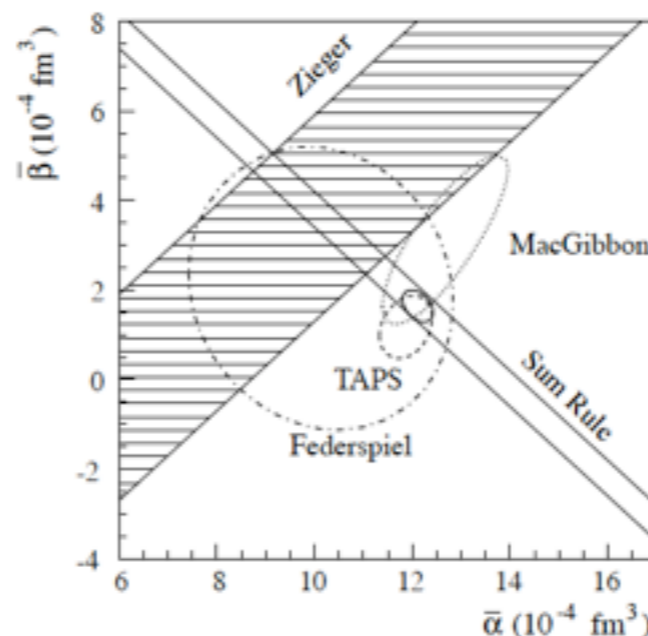
陽子

Compton scattering : E依存性

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{point} - EE' \left(\frac{E'}{E}\right)^2 \frac{e^2}{m} \left[\frac{\alpha + \beta}{2} (1 + \cos\theta)^2 + \frac{\alpha - \beta}{2} (1 - \cos\theta)^2 \right]$$

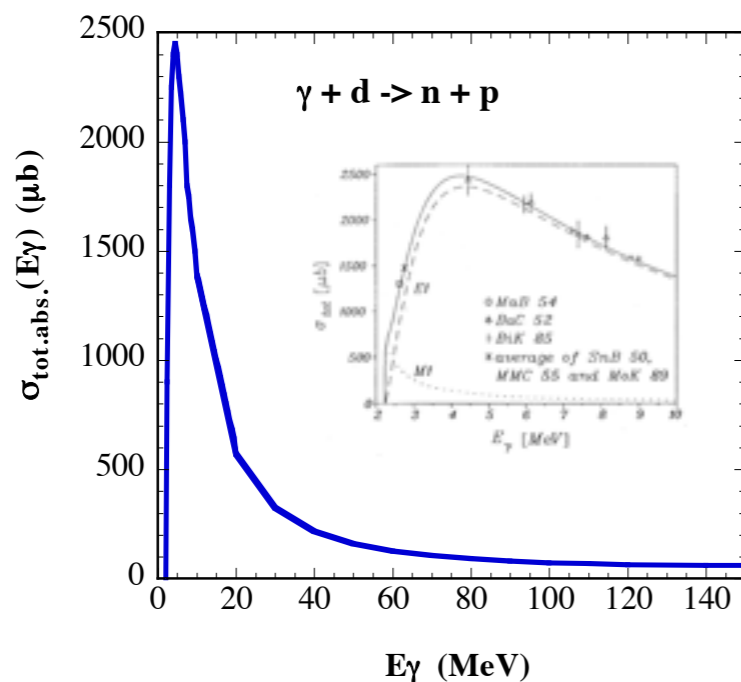
α : electric polarizability

β : magnetic polarizability



重陽子

$$\alpha = \frac{1}{2\pi^2} \int dE\gamma \frac{\sigma_{tot}(E\gamma)}{E\gamma^2}$$



$$\alpha = 0.688 \text{ fm}^3$$

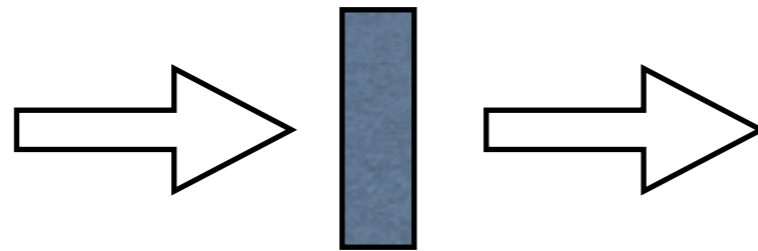
$$E_{th} \leq E\gamma \leq 40 \text{ MeV}$$

d + ²⁰⁸Pb 弾性散乱

$$\alpha = 0.7 \pm 0.05 \text{ fm}^3$$

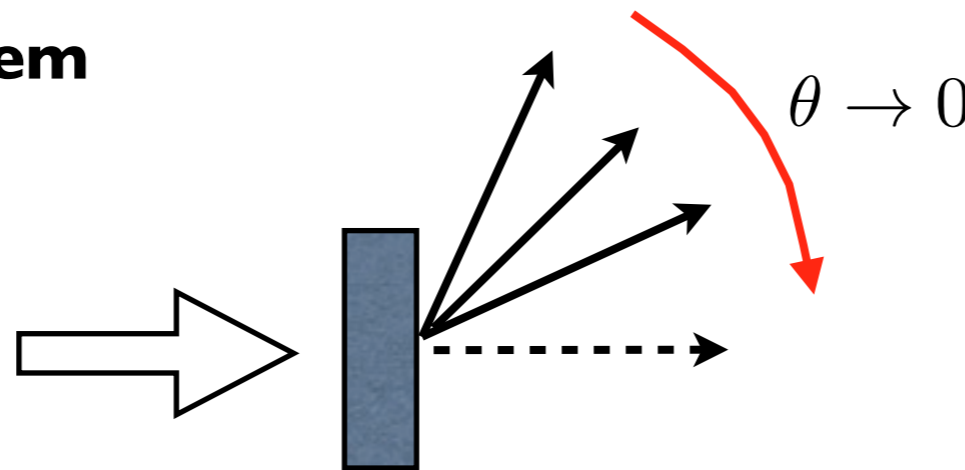
Total Photo-Absorption Cross Section の測定法

1. Attenuation method



$$N(E_\gamma) = N_0(E_\gamma)e^{-n\sigma_{tot}(E_\gamma)}$$
$$\sigma_{tot}(E_\gamma) = \sigma_{tot}^{nucl}(E_\gamma) + \sigma_{tot}^{atomic}(E_\gamma)$$

2. Optical theorem



$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E_\gamma, \theta) = |R(E_\gamma, \theta)|^2$$
$$\sigma_{tot}(E_\gamma) = 4\pi \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \text{Im}R(E_\gamma, 0)$$

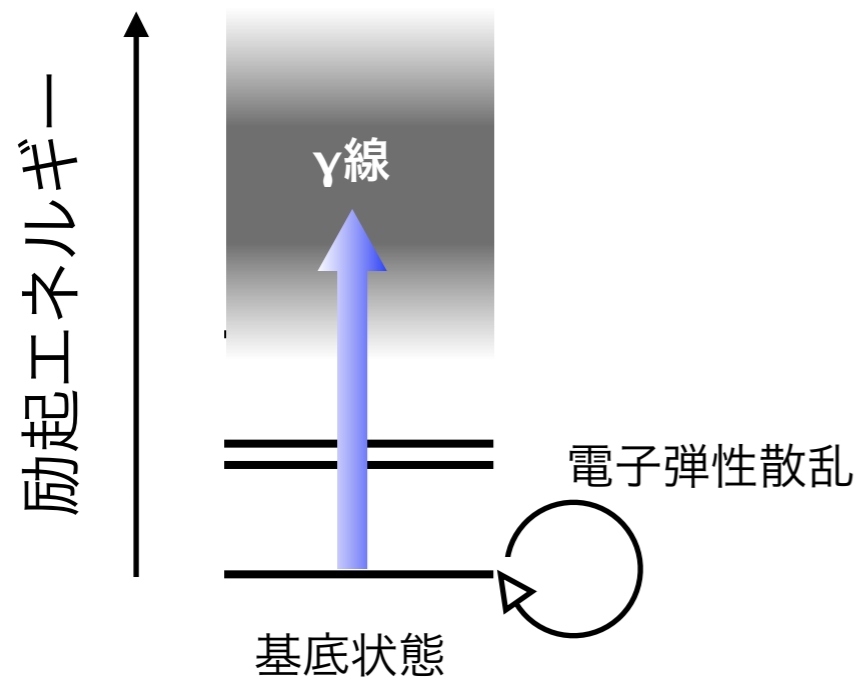
3. detecting all final states

$$\sigma_{tot}(E_\gamma) = \sigma_{tot}^A(E_\gamma) + \sigma_{tot}^B(E_\gamma) + \sigma_{tot}^C(E_\gamma) + \dots$$

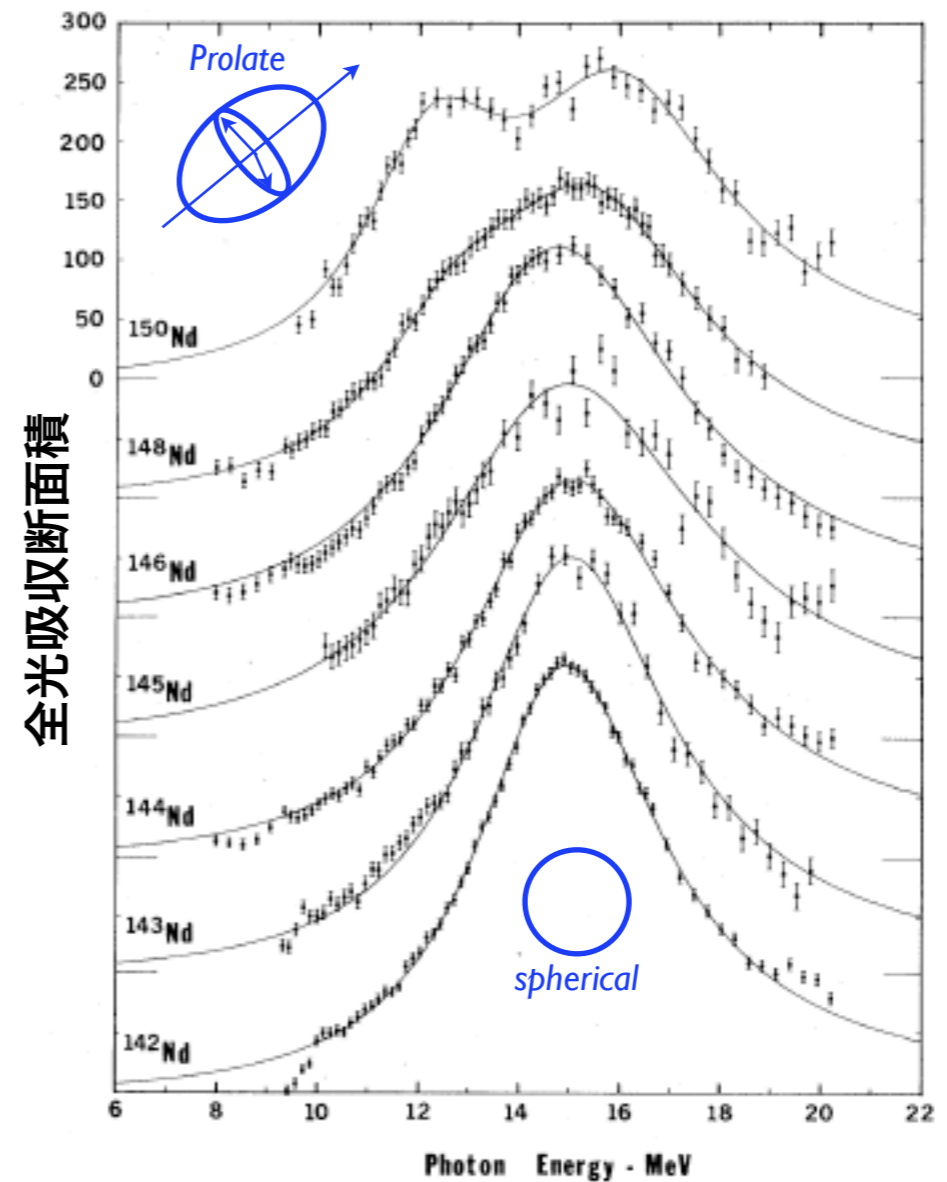
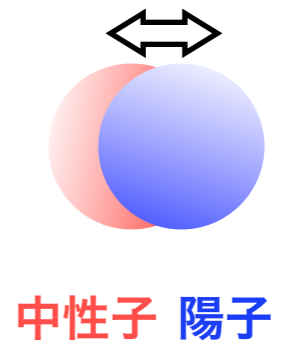
短寿命不安定核では全く不可能

おそらく SCRIT 法の応用で測定可能

光核反応



EI巨大共鳴



安定核の光核反応測定

- 1) 単色γ線 (数MeVから ~GeV)
- 2) 仮想γ線

B. L. Berman and S. C. Fultz
Rev. of Mod. Phys. 47 (1975) 713

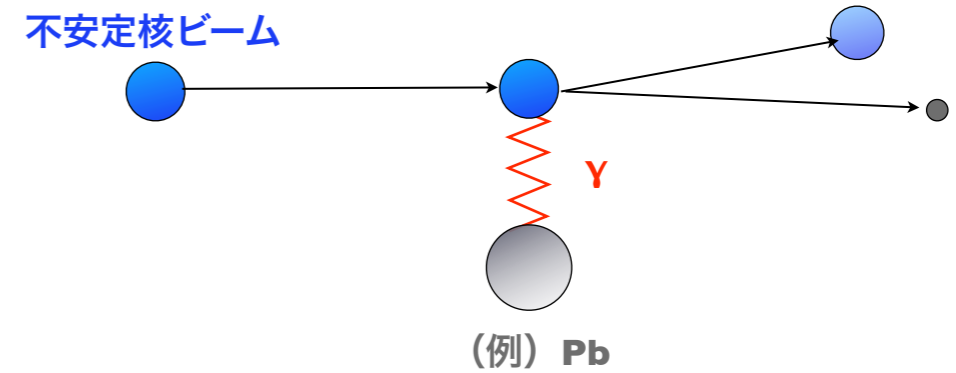
短寿命不安定核の光核反応

現在まで

重イオン反応でのクーロン励起利用が唯一の方法

問題点：核反応の寄与の可能性

多重散乱過程の寄与



SCRIT利用

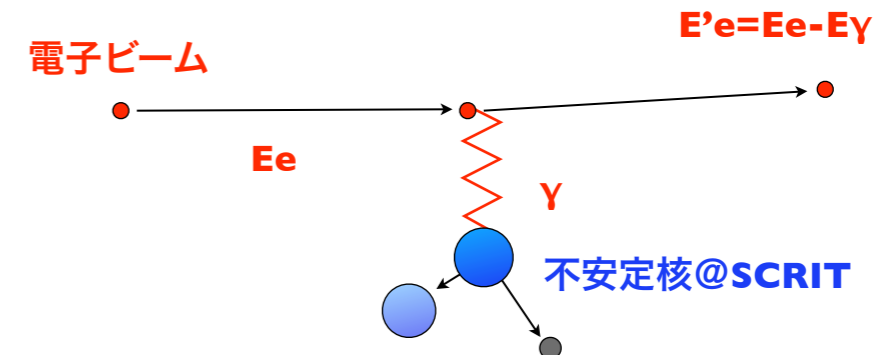
核反応の寄与無し

多重散乱過程は十分小さい

超前方電子散乱

$$\frac{d^2\sigma}{dE_e d\Omega} = \sum \frac{d^2 N_e^{EL}(E, E_\gamma, \theta)}{dE_\gamma d\Omega} \cdot \sigma_\gamma^{EL}(E_\gamma)$$

The term $\frac{d^2 N_e^{EL}(E, E_\gamma, \theta)}{dE_\gamma d\Omega}$ is circled in red and labeled 'Virtual Photon flux'.



SCRIT法と超前方電子散乱の組み合わせで

実現出来る可能性有り

既にR&Dを開始

Sn安定同位体

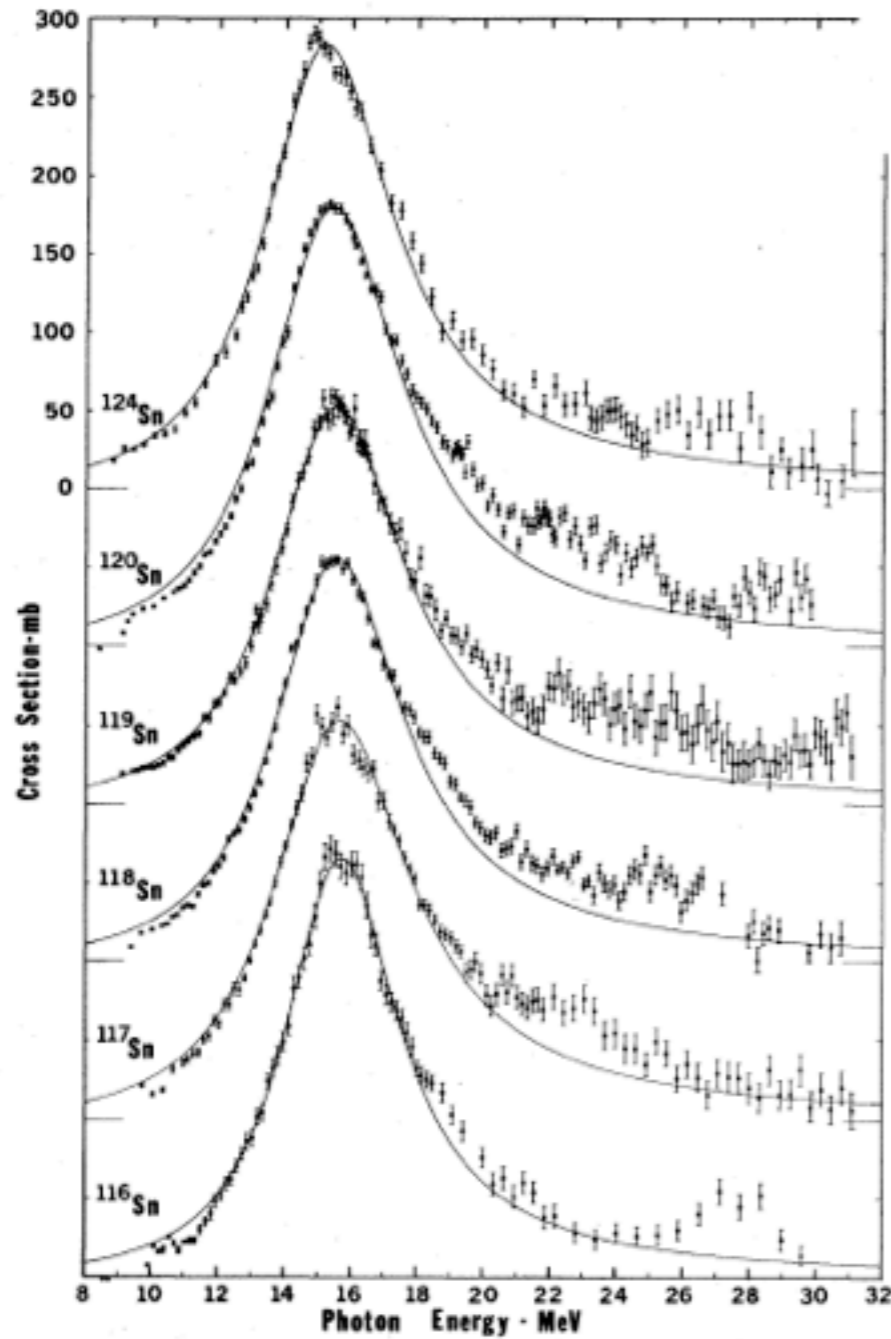
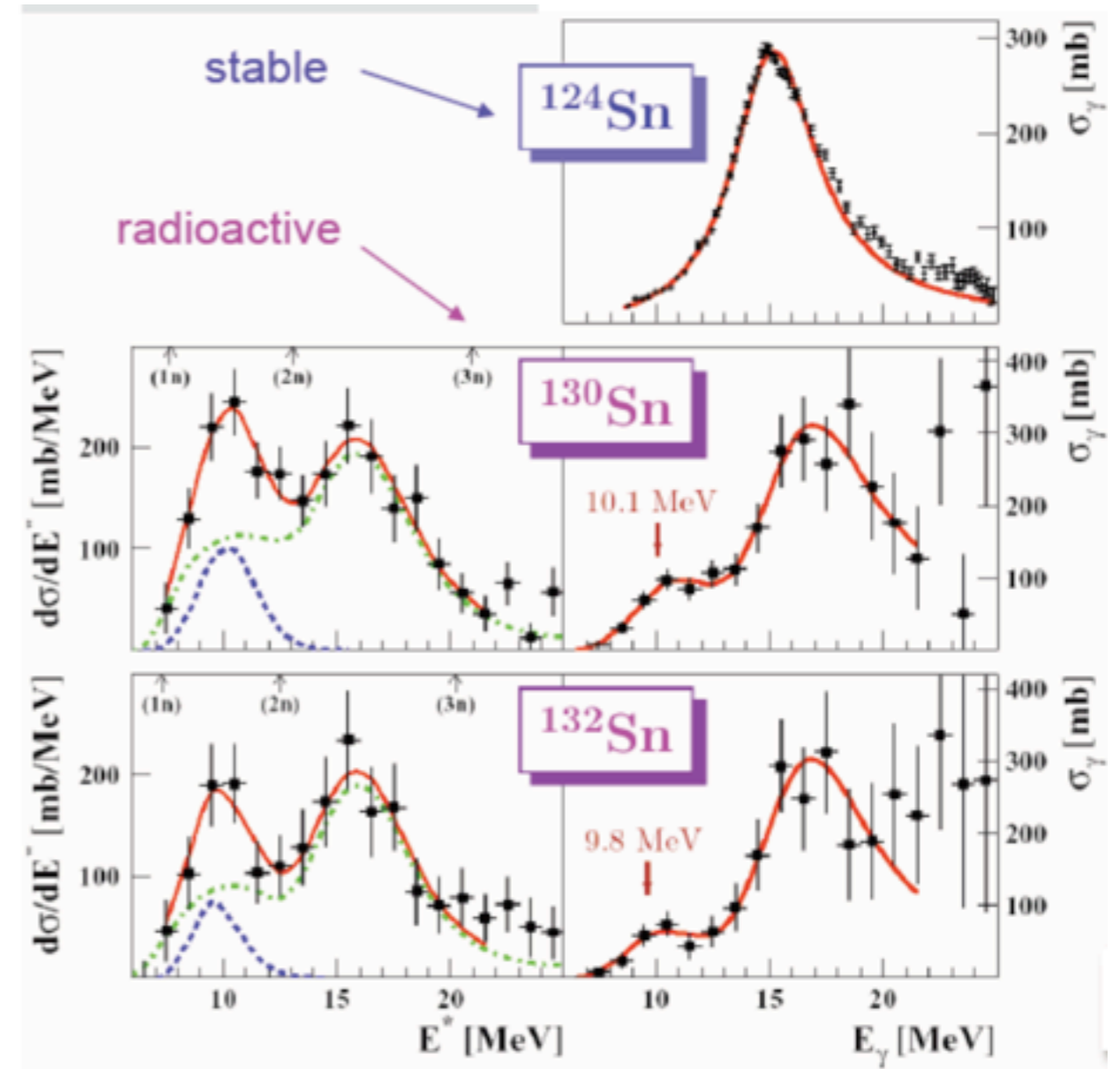


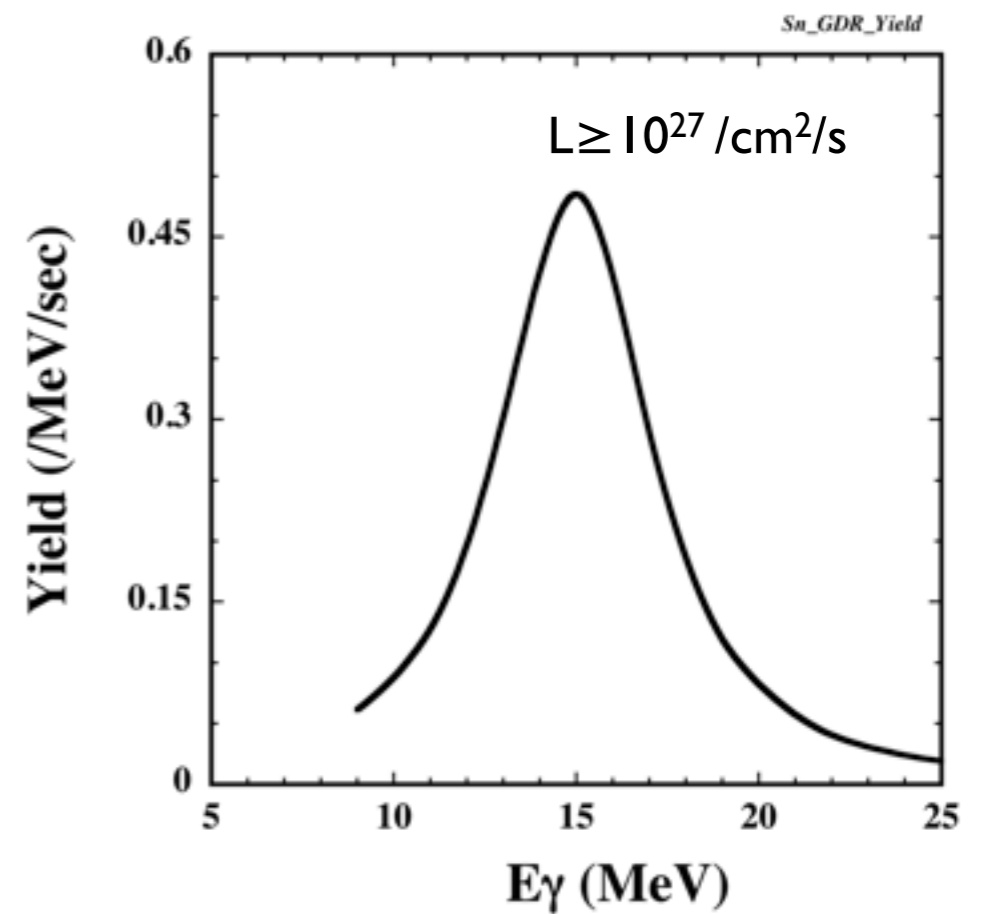
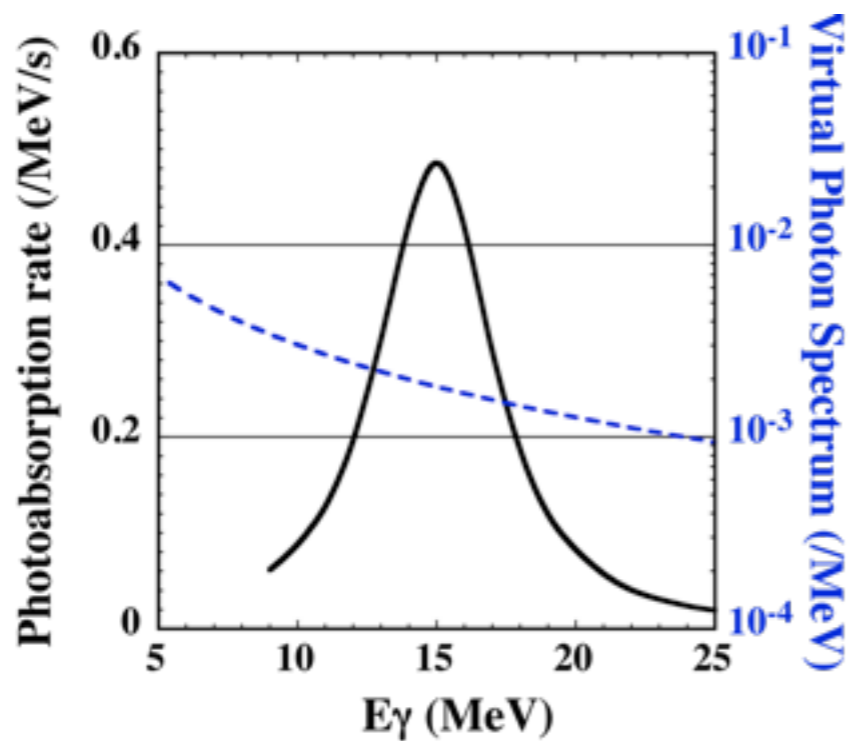
FIG. 25. Total photoneutron cross sections for the tin isotopes, showing the near-constancy of the width of the giant resonance as one adds neutrons to a nucleus having a closed proton shell (Livermore).



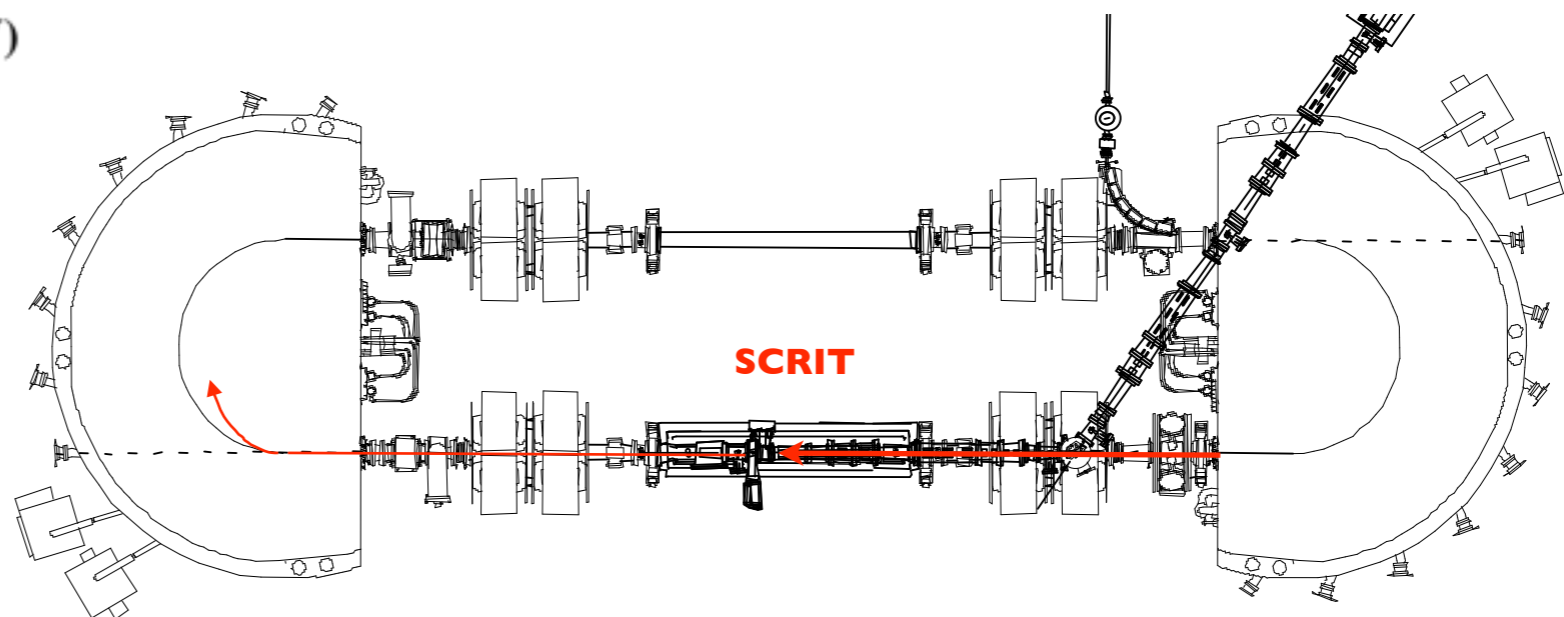
SCRIT での事象発生率

virtual photon theory

$$\frac{dN}{dE_\gamma} = L \cdot \int d\Omega \frac{d^2 N_e^{E1}(E, E_\gamma, \theta)}{dE_\gamma d\Omega} \cdot \sigma_\gamma^{E1}(E_\gamma)$$



散乱電子検出
競合過程：制動輻射
光核反応発生 of tag



まとめ

1) 電子散乱による短寿命不安定核研究を可能にする新手法 (SCRIT法)

2) 原理実証研究: 10^6 イオン数で $L=10^{26}$ /cm²/s 到達 ($L \geq 10^{27}$ /cm²/s必要)

⇒ SCRIT 法で実現できる

3) RIビームファクトリー内に不安定核専用電子散乱施設を建設

⇒ 安定核 Cs, Xe を利用し、 10^7 イオン数で $L=10^{27}$ /cm²/s を達成

⇒ より高い Luminosity 達成に向けた研究

4) 散乱電子測定系 (東北大学)、ISOL イオン源 (理研) を建設中

5) 2014 年度: 短寿命不安定核 (^{132}Sn を含むSn同位体) の電子散乱を実現

6) 短寿命不安定核の光核反応測定新手法の検討、開発

SCRIT Collaboration

東北大学	須田利美、Wang Shuo、足立竜也、玉江忠明、松田一衛 天谷達哉 (M2)、宮本嵩也 (M2)、柳嘉代子 (M1)
理化学研究所	若杉昌徳、大西哲也、市川進一、原雅弘、堀利匡
立教大学	栗田和好、榎園昭智 戸ヶ崎衛 (D1)、小川原亮 (M2)、島倉優人 (M1)
GSI	Haik Simon, Leonid Chulkov